



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO  
Facultad de Ingeniería  
Geología

**ACTUALIZACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL EN EL ACUÍFERO LOS PERALES DE  
TAPIHUE EN LA CUENCA DEL ESTERO DE CASABLANCA, REGIÓN DE VALPARAÍSO.**

Memoria para optar al título de geóloga

Autor

María Fernanda Lazcano Vivanco

Profesor guía:

Miguel Ángel Caro H.

Miembros de la comisión

Herne Etchar Kaempffer

Carlos Parraguez Decker

**SANTIAGO DE CHILE, 2018**

## Resumen

La demanda por el recurso hídrico en Chile ha aumentado con el paso de los años y cada vez es más escaso, debido al mal uso que se le da y al cambio climático que está afectando al país, provocando sequía en diversos lugares y haciendo necesario conocer la situación actual en que se encuentran los acuíferos en nuestro país, una de las principales fuentes de extracción de agua.

Este trabajo tiene como finalidad actualizar el modelo conceptual geológico e hidrogeológico del acuífero Los Perales de Tapihue, Región de Valparaíso, mediante columnas, perfiles estratigráficos y análisis de las pruebas de bombeo para determinar las constantes elásticas como transmisividad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento. El acuífero Los Perales fue definido como un acuífero semiconfinado y permeable, el cuál ha sido sobreexplotado obteniendo así un balance hídrico con valores negativos.

## Agradecimientos

Quiero agradecer en primero lugar a mis padres quienes me han apoyado y han sido el pilar fundamental a lo largo de toda la carrera y la vida, por todos los consejos, los retos, por animarme cada vez que lo necesitaba y por sobretodo agradecer por todo el amor que me han entregado en estos 24 años.

También a mi hermano por hacerme reir con todas sus tonteras, darme apoyo y cariño siempre y por hacerme sentir que puedo ser un ejemplo para el.

Agradezco a mi familia, mis abuelos, mis tias y mis primos por hacerme sentir querida cada vez que estoy con ellos, por darme comida cada vez que viajaba y sobretodo mucho amor

Gracias a Diego por ser mi compañero, mi amigo, mi pololo, por aguantarme y ayudarme cada vez que me frustraba estudiando o realizando este trabajo, por acompañarme en todas las locuras que se nos ocurrían y por esta ahí en las buenas y en las peores.

A la tía Paty y al tío Hernan por acorgerme en su familia como una más y entregarme cariño y apoyo en estos dos años.

A mis amigos Felipe, Cynthia, Gema, Cata, Conchita por esos días, noches, semanas de infinito estudio y carretes, por dame animo cuando sentía que no podía hacer algo.

A mi profesor guía, don Miguel Ángel Caro por confiar en mi para realizar este proyecto, por ayudarme en este nuevo camino de la hidrogeología, por compartirme sus experiencias, por ser una inspiración para mi, muchas gracias.

A los profesores miembros de la comisión: Carlos Parraguéz y Herne Etchart por darse el tiempo para resolver algunas dudad y ayudarme con la corrección de este trabajo.

Y gracias a todas las personas que no han sido nombradas pero que han aportado de alguna forma para llegar a esta instancia.

## Contenido

1	Introducción.....	5
1.1	Objetivos .....	5
1.1.1	Objetivo Principal.....	5
1.1.2	Objetivos específicos.....	6
1.2	Hipótesis.....	6
1.3	Metodología.....	6
2	Antecedentes generales de la zona de estudio .....	8
2.1	Ubicación y vías de acceso .....	8
2.2	Geomorfología y Relieve.....	9
2.3	Hidrología.....	10
2.3.1	Clima .....	11
2.3.2	Hidrografía .....	12
2.4	Marco Geológico.....	13
2.4.1	No consolidados.....	13
2.4.2	Unidades Intrusivas.....	14
2.5	Trabajos anteriores .....	17
3	Geología .....	21
3.1	Geología de sub-superficie .....	21
3.1.1	Estratigrafía.....	23
3.2	Hidrogeología.....	28
3.2.1	Unidades Hidrogeológicas.....	28
4	Características de la cuenca y del acuífero .....	30
4.1	Morfología del terreno .....	31
4.2	Niveles estáticos y espesor del acuífero .....	32
4.2.1	Niveles estáticos.....	32
4.2.2	Espesor del acuífero.....	33
4.3	Constantes elásticas.....	34
4.3.1	Transmisividad (T).....	34
4.3.2	Permeabilidad o conductividad hidráulica (K) .....	35
4.3.3	Coeficiente de Almacenamiento (S).....	38
4.4	Dirección de flujo .....	39

5	Balance Hídrico .....	42
5.1	Entradas .....	42
5.1.1	Precipitaciones .....	43
5.2	Salidas .....	43
5.2.1	Evapotranspiración real (ETR) .....	43
5.2.2	Demanda artificial .....	44
5.3	Resultados .....	46
5.3.1	Recarga .....	46
5.3.2	Descargas .....	48
5.4	Balance Hídrico .....	49
6	Modelo conceptual .....	53
6.1	Modelo conceptual geológico .....	53
6.2	Modelo conceptual hidrogeológico .....	54
6.2.1	Hidrogeología .....	54
6.2.2	Hidrología .....	54
7	Discusión .....	56
7.1	Estratigrafía .....	56
7.2	Hidrogeología .....	56
7.3	Hidrología .....	58
7.4	Modelo conceptual .....	58
8	Conclusiones .....	59
8.1	Estratigrafía .....	59
8.2	Hidrogeología .....	59
8.3	Hidrología .....	60
8.4	Modelo conceptual .....	61
9	Referencias .....	62
10	Anexos .....	64
10.1	Anexo 1: Antecedentes Generales de la cuenca .....	64
10.2	Anexo 2: Estratigrafía .....	67
10.3	Anexo 3: Unidades Hidrogeológicas .....	70
10.4	Anexo 4: Características del acuífero .....	73
10.5	Anexo 5: Geofísica .....	76

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.-</b> Mapa de ubicación y vías de acceso. Elaboración Propia .....	8
<b>Figura 2.-</b> Mapa geomorfológico de zona de estudio. Los colores verdes representan las zonas de menor altura (Planicie Costeras), las amarillas las zonas medias (Terrazas de abrasión marina) y las rojas las zonas de mayor altura (Cordillera de la Costa). Elaboración Propia .....	10
<b>Figura 3.-</b> Gráfico de precipitaciones medias anuales (mm). Elaboración propia .....	11
<b>Figura 4.-</b> Mapa hidrográfico de la zona de estudio, el cauce principal es el estero Casablanca. Elaboración propia .....	12
<b>Figura 5.-</b> Mapa geológico de la zona de estudio. Modificado de Gana et al., 1996.....	16
<b>Figura 6.-</b> Columnas estratigráficas en el perfil B-B. G. Cabrera, 1991. ....	18
<b>Figura 7.-</b> Perfil estratigráfico B-B. Modificado de G. Cabrera, 1991.....	19
<b>Figura 8.-</b> Mapa con los perfiles realizados. Modificado de Google Earth.....	23
<b>Figura 9.-</b> Columnas estratigráfica del pozo P038. Elaboración propia. ....	24
<b>Figura 10.-</b> Columnas estratigráfica del pozo P025. Elaboración propia. ....	25
<b>Figura 11.-</b> Columna estratigráfica del pozo P001. Elaboración propia. ....	26
<b>Figura 12.-</b> Perfil esquemático del subsuelo. Elaboración propia. ....	27
<b>Figura 13.-</b> Perfil esquemático de las unidades hidrogeológicas de la cuenca. Elaboración propia .....	29
<b>Figura 14.-</b> Mapa con la distribución espacial de los pozos dentro del valle Los Perales de Tapihue y su respectiva información. Elaboración propia.....	30
<b>Figura 15.-</b> Mapa topográfico cada 50 metros del valle Los Perales de Tapihue. Elaboración propia. ....	31
<b>Figura 16.-</b> Mapa de isopiezas, cada 10 metros del acuífero Los Perales de Tapihue. Elaboración propia. ....	32
<b>Figura 17.-</b> Mapa de espesores máximos para distintas secciones del acuífero. Elaboración propia. ....	33
<b>Figura 18.-</b> Mapa de transmisividades. Elaboración propia .....	36
<b>Figura 19.-</b> Mapa de permeabilidad. Elaboración propia .....	37
<b>Figura 20.-</b> Mapa de dirección de flujo subterráneo. Elaboración propia.....	41
<b>Figura 21.-</b> Mapa de distribución de cuencas laterales. Modificada de Google Earth ..	42
<b>Figura 22.-</b> Cantidad de pozos construidos por año. Elaboración propia .....	45
<b>Figura 23.-</b> Cantidad de pozos acumulados por año. Elaboración propia .....	45
<b>Figura 24.-</b> Mapa con la ubicación de los pozos de observación Mida del Agua y Fundo La Vega. Modificado de Google Earth .....	51
<b>Figura 26.-</b> Gráfico de variación de niveles estáticos en estación seca v/s precipitaciones. Elaboración propia .....	52
<b>Figura 25.-</b> Gráfico de variación de niveles estáticos en estación húmeda v/s precipitaciones. Elaboración propia .....	52
<b>Figura 27.-</b> Modelo conceptual geológico. Elaboración propia. ....	54
<b>Figura 28.-</b> Modelo conceptual hidrogeológico. Elaboración propia. ....	55

<b>Figura 29.-</b> Perfiles de estudio para los diferentes valles de la cuenca de Casablanca. G. Cabrera, 1991.....	65
<b>Figura 30.-</b> Plano de áreas de isotransmisividad. G. Cabrera, 1991.....	66
<b>Figura 31.-</b> Perfil estratigráfico A-A'. Elaboración propia .....	67
<b>Figura 32.-</b> Perfil estratigráfico B-B'. Elaboración propia .....	68
<b>Figura 33.-</b> Perfil estratigráfico C-C'. Elaboración propia.....	69
<b>Figura 34.-</b> Perfil hidrogeológico A-A'. Elaboración propia .....	70
<b>Figura 35.-</b> Perfil hidrogeológico B-B'. Elaboración propia .....	71
<b>Figura 36.-</b> Perfil hidrogeológico C-C'. Elaboración propia.....	72
<b>Figura 37.-</b> Mapa de la ubicación de los perfiles geofísicos. Modificado de Google Earth.....	76
<b>Figura 38.-</b> Perfil geofísico L10. Elaboración propia.....	77
<b>Figura 39.-</b> Perfil geofísico L11. Elaboración propia.....	78
<b>Figura 40.-</b> Perfil geofísico L20. Elaboración propia.....	79

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.-</b> Pozos utilizados para el análisis estratigráfico. Elaboración propia .....	21
<b>Tabla 2.-</b> Clasificación del acuífero según transmisividad (Custodio y Llamas, 1996)..	35
<b>Tabla 3.-</b> Clasificación del acuífero según la permeabilidad (Custodio y Llamas, 1996) .....	37
<b>Tabla 4.-</b> Precipitaciones totales por mes (mm). Elaboración propia.....	43
<b>Tabla 5.-</b> Caudales otorgados. Elaboración propia .....	46
<b>Tabla 6.-</b> Recarga según cuencas laterales y área total de la cuenca para el método 1. Elaboración Propia.....	47
<b>Tabla 7.-</b> Recarga según cuencas laterales y área total de la cuenca para el método 2. Elaboración Propia.....	48
<b>Tabla 8.-</b> Evapotranspiración real para las cuencas lateral y el área total. Elaboración propia. ....	49
<b>Tabla 9.-</b> Demanda antrópica total, considerando un factor de uso de 20%. Elaboración propia .....	49
<b>Tabla 10.-</b> Precipitaciones medias anuales (mm). Elaboración propia .....	64
<b>Tabla 11.-</b> Niveles estáticos obtenidos de la campaña de Rizzos durante los meses de septiembre-octubre del 2014.....	73
<b>Tabla 12.-</b> Valores de transmisividad, espesor y permeabilidad del acuífero. Elaboración propia .....	75
<b>Tabla 13.-</b> Secciones y valores de parámetros para el cálculo de la dirección de flujo. Elaboración propia .....	76
<b>Tabla 14.-</b> Información obtenida del perfil geofísico L10. (Geodatos).....	77
<b>Tabla 15.-</b> Información obtenida del perfil geofísico L11. (Geodatos).....	78
<b>Tabla 16.-</b> Información obtenida del perfil geofísico L20. (Geodatos).....	79

## **1 INTRODUCCIÓN**

---

El estudio continuo de los recursos hídricos de Chile tiene una gran importancia debido a la situación actual en el que se encuentra. La gran cantidad de demanda del recurso que existe en distintos sectores productivos como lo es la ganadería, agricultura, minería, industrias e incluso para consumo humano en áreas urbanas y rurales, sumado a los cambios climáticos que se han acrecentado en el último periodo, ha dejado a gran parte del país con un déficit de precipitaciones generando la sobreexplotación de los acuíferos. Para poder estudiar las aguas subterráneas es importante conocer cuál es el estado en el que se encuentra el acuífero y así determinar el balance hídrico y poder tomar medidas para la conservación y explotación sustentable del recurso.

Este trabajo tiene como finalidad actualizar el modelo conceptual y por ende estudiar la geología e hidrogeología que está presente en el sector del acuífero de Los Perales de Tapihue de la cuenca del estero de Casablanca.

Para lograr establecer la actualización del modelo conceptual del acuífero es necesario estudiar los antecedentes de trabajos anteriores, además del análisis a las pruebas de bombeos, las cuales permiten establecer las constantes elásticas. Estas pruebas de bombeo y otros datos como caudales y niveles están en la base de datos de la Dirección General de Aguas (DGA).

### **1.1 OBJETIVOS**

#### *1.1.1 Objetivo Principal*

El objetivo principal del presente trabajo es actualizar los Modelos Conceptuales geológico e hidrogeológico del acuífero Los Perales de Tapihue ubicado en la comuna de Casablanca, región de Valparaíso.



### *1.1.2 Objetivos específicos*

- 1) Actualización de catastro de pozos presente en la zona de estudio
- 2) Redefinición de la geología local a partir de nueva información geológica
- 3) Redefinición de la geología de sub-superficie a partir de nueva información estratigráfica de sondajes ubicados en el acuífero.
- 4) Definición de unidades hidrogeológicas del acuífero
- 5) Determinación de los parámetros elásticos del acuífero: transmisividad y coeficiente de almacenamiento.
- 6) Determinación de magnitud y sentidos de flujos subterráneos en las unidades hidrogeológicas.
- 7) Determinación de los mecanismos de recarga y descarga del acuífero
- 8) Cuantificar la magnitud de las recargas y descargas del sistema acuífero
- 9) Determinación del balance hídrico del acuífero

## **1.2 HIPÓTESIS**

Es posible actualizar el modelo conceptual geológico e hidrogeológico que existe actualmente de la cuenca del estero de Casablanca en la zona acuífera de Los Perales de Tapihue a partir de la recopilación de datos y análisis de estos.

## **1.3 METODOLOGÍA**

El presente trabajo se realizó a partir de la recopilación de antecedentes estadísticos, hidrológicos, geológicos e hidrogeológicos del valle Los Perales de Tapihue ubicado en la comuna de Casablanca, Región de Valparaíso. Cabe destacar que en este estudio no existió trabajo de terreno.

Para responder a los objetivos específicos se debe cumplir con la metodología señalada a continuación:

- 1) Recopilar expedientes de solicitud de derechos de agua en la Dirección General de Aguas (DGA) para crear base de datos

- 2) Revisión de nueva información geológica para actualización del modelo geológico existente.
- 3) Revisar columnas estratigráficas presentes en los expedientes, unificar nomenclatura de la estratigrafía de subsuperficie y determinar la geología de la cuenca.
- 4) Determinar las unidades hidrogeológicas del acuífero en base a la geología de la cuenca establecida anteriormente.
- 5) Determinar la transmisividad ( $m^2/d$ ) en base de las pruebas de bombeos de gasto constante presentes en los expedientes, calcular la permeabilidad ( $m/d$ ) a partir de la transmisividad y el espesor saturado del acuífero establecido a partir de la campaña realizada por Geodatos S.A. en noviembre del 2014 y determinar el coeficiente de almacenamiento a partir de datos bibliográficos.
- 6) Generar mapa de equipotenciales a partir de los niveles piezométricos medidos en la campaña de terreno desarrollada por la empresa Rizzo Associates en septiembre-octubre de 2014 y calcular el flujo subterráneo a partir del gradiente hidráulico ( $i$ ) y la transmisividad ( $T$ )
- 7) Determinar descargas y recargas del acuífero en base a información meteorológica de la estación Ventisquero-Tapihue y el catastro de pozo de la cuenca.
- 8) Calcular el balance hídrico a partir de las recargas y descargas determinadas previamente.
- 9) Realizar el modelo conceptual a partir de la información determinada anteriormente.

## 2 ANTECEDENTES GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 2.1 UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El área de estudio se localiza en la V Región de Valparaíso y en la provincia del mismo nombre, comuna de Casablanca, al norte de la localidad de Casablanca a unos 76 km de Santiago, entre las coordenadas  $33^{\circ}10'$  y  $33^{\circ}25'$  de latitud sur y  $71^{\circ}10'$  y  $71^{\circ}40'$  de longitud oeste.

La vía principal para acceder desde Santiago es a través de la ruta 68 (Figura 1)

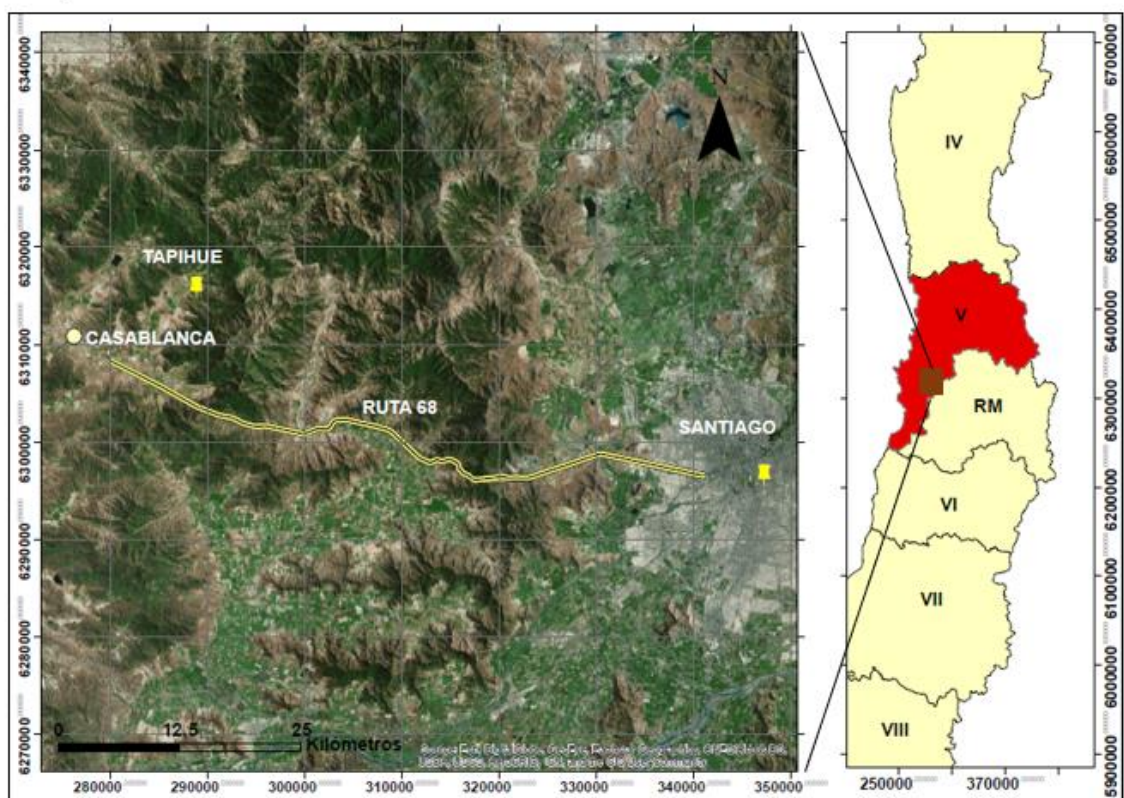
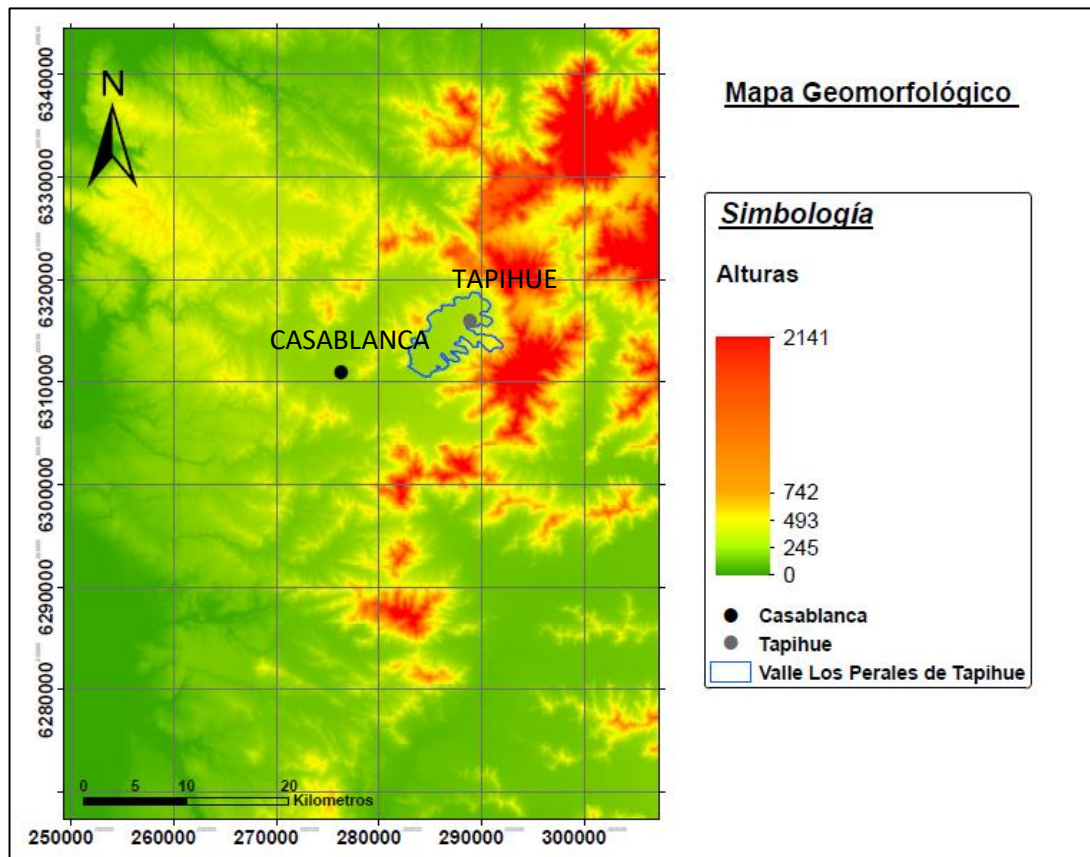


Figura 1.- Mapa de ubicación y vías de acceso. Elaboración Propia

## 2.2 GEOMORFOLOGÍA Y RELIEVE

La cuenca en estudio se encuentra en una zona en donde se pueden distinguir tres unidades geomorfológicas principales: Cordillera de la Costa, Planicie Costera y terrazas de abrasión marina (Corvalán y Álvarez, 1966). En la Figura 2 se pueden distinguir estas tres unidades, siendo el color verde oscuro representativo de las planicies costeras, en verde más claro las terrazas de abrasión marina y en la zona noreste de la cuenca se distingue una zona de color rojo que representa la Cordillera de la Costa.

- a) *Cordillera de la Costa*: Conformada por serranías graníticas que se presentan como macizo montañoso con pendiente relativamente abrupta, con cumbres que superan los 1450 m.s.n.m, (Cerro Mauco), las cuales se van suavizando y descendiendo gradualmente hacia el poniente.
- b) *Planicie Costera*: Se extiende en la mayor parte de la cuenca, desarrollándose aproximadamente desde la línea de costa actual hasta los 500 m.s.n.m. En esta unidad están emplazados los cuatro valles que conforman la cuenca del estero de Casablanca, con secciones que alcanzan los 3 km de ancho.
- c) *Terrazas de abrasión*: Tiene una morfología de relieve maduro, caracterizado por diferentes niveles que varían entre 100-500 m.s.n.m. Constituidas por rocas pertenecientes al basamento plutónico paleozoico-jurásico y escasos remanentes de rocas sedimentarias del Cretácico Superior-Paleógeno. El basamento se encuentra cubierto de forma sub-horizontal por unidades sedimentarias marinas y continentales del Neógeno y en parte del Pleistoceno.



**Figura 2.-** Mapa geomorfológico de zona de estudio. Los colores verdes representan las zonas de menor altura (Planicie Costeras), las amarillas las zonas medias (Terrazas de abrasión marina) y las rojas las zonas de mayor altura (Cordillera de la Costa). Elaboración Propia

## 2.3 HIDROLOGÍA

Una cuenca hidrológica es una zona de la superficie terrestre, en donde las gotas de lluvia que caen sobre ellas son drenadas por el sistema hidrológico hacia un mismo punto de salida. La zona de estudio forma parte de la cuenca de Casablanca, la cual se compone de cuatro valles o subcuencas: Lo Orozco, Lo Ovalle, Los Perales de Tapihue y La Vinilla-Casablanca. Como se observa en la Figura 3, las cuencas tienen el mismo nombre que el estero perteneciente a ellas.

Para los parámetros climáticos se utilizaron los datos de las estaciones meteorológicas Casablanca y Tapihue ubicadas en el valle correspondiente con el mismo nombre.

### 2.3.1 Clima

El clima predominante en la ciudad de Valparaíso es templado cálido con lluvias invernales, estación seca prolongada de 6 a 8 meses y gran nubosidad, se caracteriza porque la diferencia entre las temperaturas mínimas y máximas diarias se atenúan por el efecto oceánico (DGAC,2001), en verano la oscilación térmica es de aproximadamente 28 °C con temperaturas mínimas de 6°C y máximas de 34°C y en invierno oscila en promedio 22 °C siendo la temperaturas extremas entre -2 y 20 °C. Presenta generalmente, una cobertura con nubosidad baja matinal y humedad relativa elevada. Las precipitaciones son afectadas por la influencia del relieve que las incrementa proporcionalmente a la elevación del terreno, el bloqueo que ejerce la cordillera de la costa con su altura ocasiona preferentemente precipitaciones en los sectores occidentales de esta y se concentran principalmente en invierno, entre mayo y agosto, pero a través de los años las precipitaciones han disminuido como lo muestra el gráfico de la Figura 3 realizado a partir de la Tabla 10 del Anexo 1.

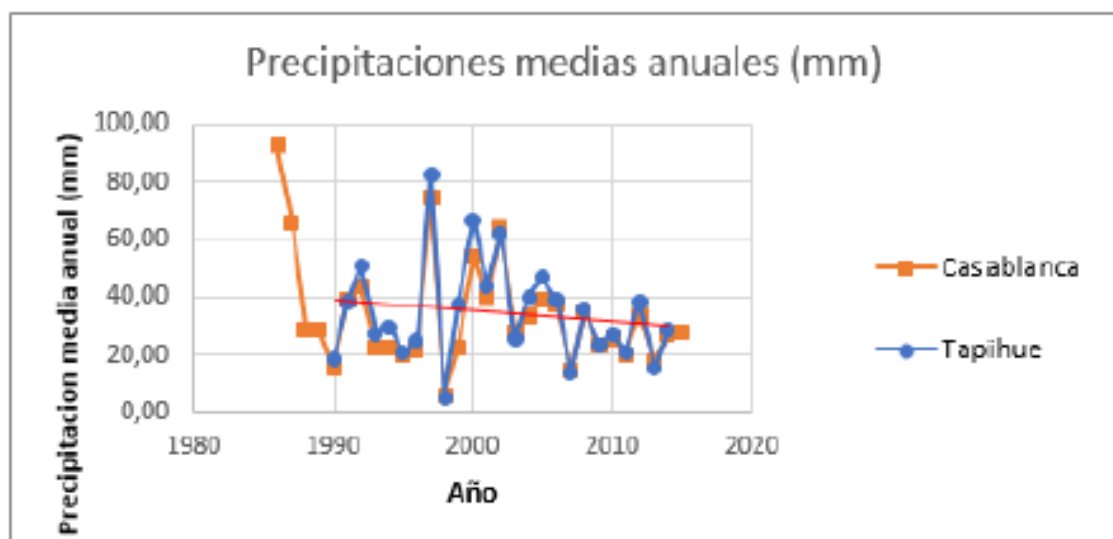
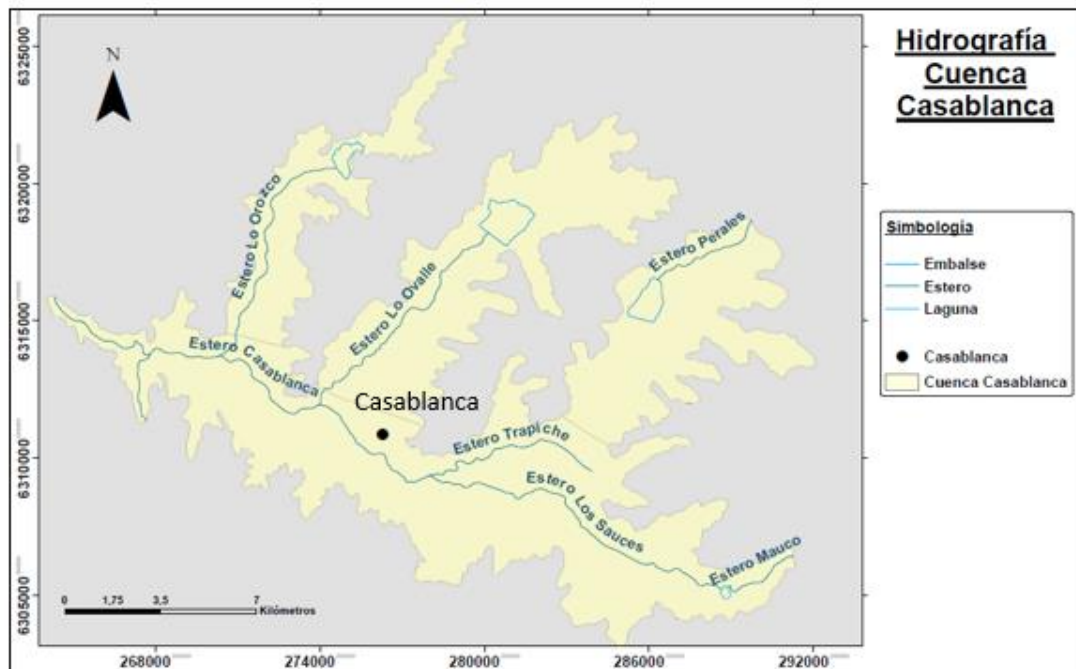


Figura 3.- Gráfico de precipitaciones medias anuales (mm). Elaboración propia

### 2.3.2 Hidrografía

La cuenca de Casablanca forma parte de la hoya hidrográfica de las cuencas costeras entre Aconcagua y Maipo.

En la cuenca se distinguen cuatro valles: La Vinilla-Casablanca, Los Perales de Tapihue, Lo Ovalle y Lo Orozco. El estero principal es el estero Casablanca y es de régimen pluvial y se constituye un poco al oriente de la localidad de Casablanca por la confluencia de los esteros Los Sauces y Trapiche (Figura 4). Fluye en dirección SE-NW y en el curso recibe aportes de los esteros de Lo Ovalle y Lo Orozco siendo estos sus mayores afluentes. Además, se localizan 4 embalses: Lo Orozco, Lo Ovalle, Los Perales y La Vinilla, todos de baja capacidad, un volumen total de 25 millones de  $m^3$ , pero que desde al menos 7 años no tienen agua. Finalmente, el estero Casablanca desemboca en el Océano Pacífico a la altura de Tunquén.



**Figura 4.-** Mapa hidrográfico de la zona de estudio, el cauce principal es el estero Casablanca. Elaboración propia

## **2.4 MARCO GEOLÓGICO**

Se presentan las unidades geológicas presentes en la zona de estudio, clasificadas en no consolidadas e intrusivas. Las diferentes unidades y su ubicación se muestran en el mapa geológico de la zona (Figura 5)

### *2.4.1 No consolidados*

Los depósitos no consolidados abarcan prácticamente el total de la cuenca de Casablanca. De acuerdo con Gana, Wall y Gutiérrez (1996) regionalmente se distinguen siete tipos de depósitos no consolidados: eólicos, litorales, lacustres, remoción en masa, coluviales, aluviales y fluviales. En la cuenca están presentes los tres últimos los cuales serán descritos a continuación.

#### **Qc. Depósitos coluviales (Holoceno)**

Estos sedimentos no consolidados se ubican en las cabeceras de las quebradas, corresponden, en su mayoría a depósitos gravitacionales correspondientes a flujos masivos, matriz-soportados y granulométricamente de muy mala selección, que puede incluir desde arcilla a bloques que se interdigitan con lentes de grava y arenas y son generados por cursos de agua de tamaño reducido que pueden variar de ser esporádicos a ser cursos permanentes.

#### **Qa. Depósitos aluviales (Holoceno)**

Estos sedimentos no consolidados se ubican en la zona de llanuras y corresponden a depósitos fluviales con depósitos gravitacionales que comprenden flujos de barro y detrito interdigitados, se componen de limos, arenas y gravas. Dentro de estos depósitos existen placeres auríferos como minas Aurum Chile y Última Esperanza.



#### **Qf. Depósitos fluviales (Holoceno)**

Estos sedimentos no consolidados corresponden a depósitos de cursos fluviales activos. En su mayoría son facies de relleno de canal con base erosiva, corresponden a gravas clastosoportadas, de bordes redondeados a muy redondeados y baja esfericidad, en ciertas zonas se presentan imbricados. Existen lentes de arena con estratificación plana y cruzada, existen limos finamente laminados, pero son escasos. Dentro de estos depósitos existen placeres auríferos como minas Los Esteros, El Crucero y Las Dichas.

#### **Qfs. Depósitos fluviales subactuales (Holoceno)**

Estos sedimentos no consolidados corresponden a cursos fluviales que actualmente no existen. Comprenden limos, arenas y gravas con desarrollo de cubierta vegetal. Con respecto al curso fluvial activo son reconocidos a un mismo nivel topográfico

#### **QTt. Terrazas de abrasión**

Plioceno (?) - Pleistoceno

Unidad morfológica de erosión marina, labradas sobre intrusivos paleozoicos, jurásicos y formaciones sedimentarias terciarias, preservada en la zona costera a cotas que varían entre los 40 y 550 m.s.n.m. Dentro de esta unidad están incluidas terrazas de abrasión, sin cubierta sedimentaria, terrazas con una cubierta de arenas cuarzosas, posiblemente marinas y terrazas con cubierta aluvial. En general está presente en toda la cuenca

#### **2.4.2 Unidades Intrusivas**

Las Unidades intrusivas se encuentran descritas por edad, desde la más antigua a la más joven.

Paleozoico

**Pzgm. Tonalitas y granodioritas y monzogranitos de anfíbola-biotita**

Afloran en el sector suroeste de la cuenca. Color gris medio verdoso. Rocas de grano grueso a medio. Contienen feldespato con entrecrecimiento perítico, piroxenos reemplazados por anfíbola y biotita. Los monzogranitos poseen mica blanca primaria.

Jurásico

**Jlt. Tonalita y granodiorita de anfíbola-biotita.**

Este intrusivo aflora principalmente en la zona noroeste de la zona de estudio. De color gris claro, grano medio a grueso. Su principal mineralogía es plagioclasa zonada, anfíbola y biotita, además de apatito, circón y epidota accesorio.

**Jpgb. Gabros de hornblenda.**

Este intrusivo aflora hacia el suroeste de la cuenca. De color gris oscuro verdoso, grano medio a grueso. Su principal mineralogía es hornblenda poikilitica con biotita y anfíbola. La plagioclasa es escasa.

Constituye un plutón circular de 2,3 km de diámetro (Las Melosillas)

**Jpg. Granitos, tonalitas y granodioritas de hornblenda-biotita.**

Este intrusivo aflora en el sector centro-sur de la cuenca de Casablanca. De color gris claro amarillento, grano medio a fino. Su mineralogía principal es cuarzo, plagioclasa, feldespato, biotita.

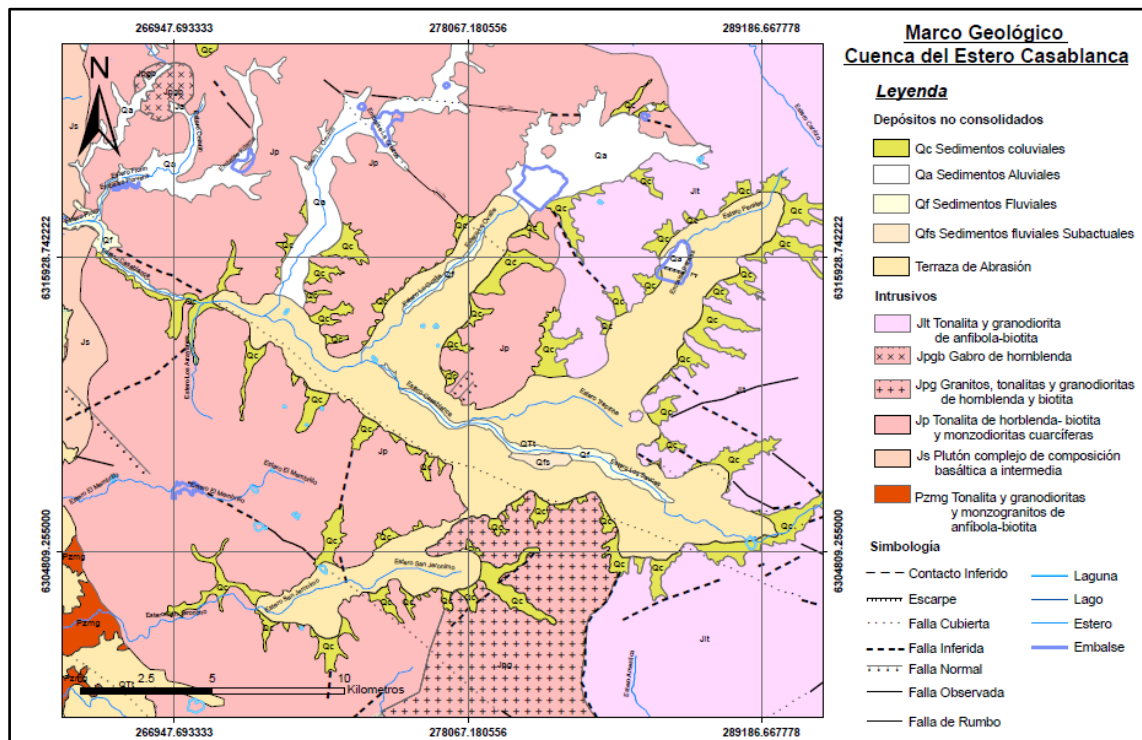
### **Jp. Tonalita de hornblenda-biotita y monzodioritas cuarcíferas.**

Este intrusivo aflora tanto en la zona noreste como en la zona sureste de la cuenca de Casablanca. De color gris, de grano medio grueso a fino. Su principal mineralogía es plagioclasa micropertítica, cuarzo y anfíbolos. Contacto gradual con Jlt.

### **Js. Plutón complejo de composición basáltica a intermedia.**

Aflora en sector oeste de la cuenca. Lo componen principalmente dioritas cuarcíferas de piroxeno-hornblenda-biotita, con tonalitas de hornblenda-biotita y gabros subordinados.

De color gris oscuro, grano medio a fino, en parte foliada, de origen magmático y también tectónico. Su mineralogía principal es plagioclasa zonada y anfíbola. Los gabros contienen núcleos de olivino rodeados por ortopiroxenos y clinopiroxenos. Contacto gradual con Jp.



**Figura 5.-** Mapa geológico de la zona de estudio. Modificado de Gana et al., 1996

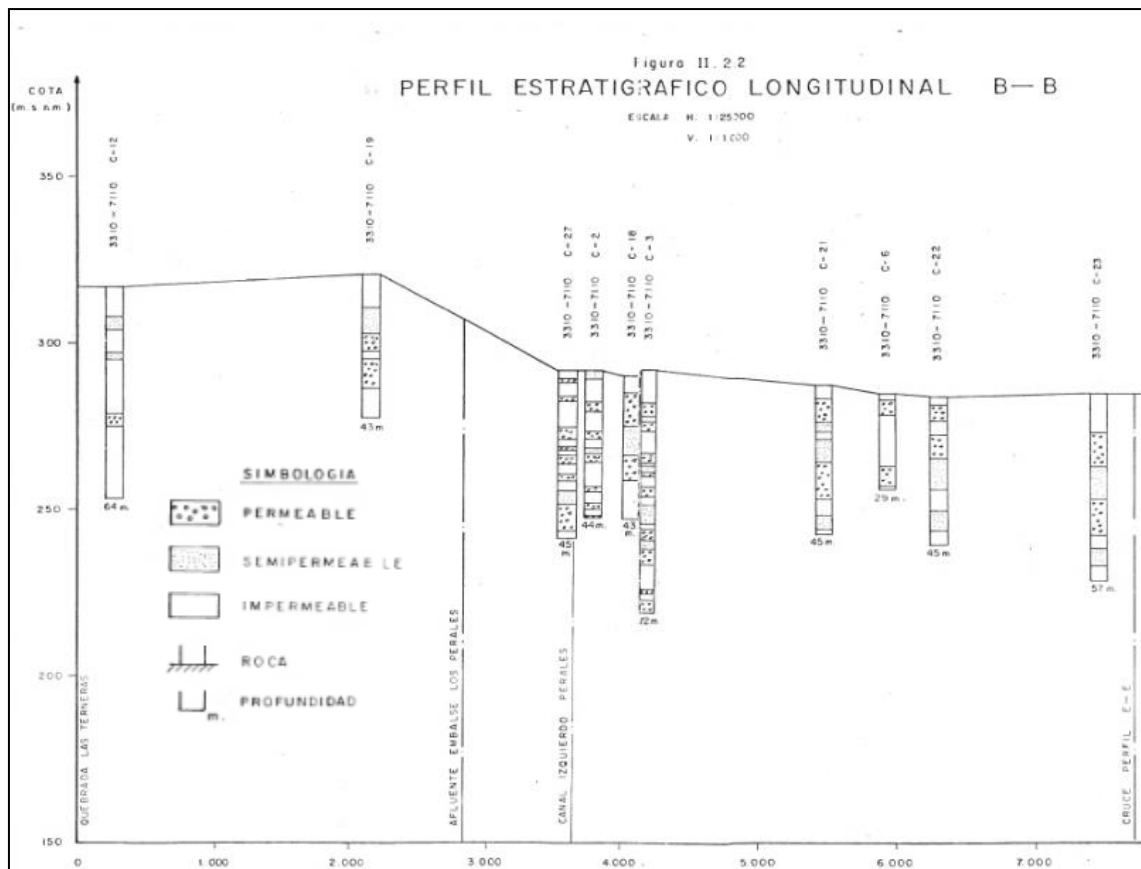
## **2.5 TRABAJOS ANTERIORES**

Se utilizó el modelo realizado en el estudio de AC. Ingenieros consultores LTDA, dirigido por Guillermo Cabrerías en el año 1991, en el informe denominado “Estudio básico para la modelación del sistema de aguas subterráneas del valle de Casablanca” se incluye información recopilada en terreno tales como: información de niveles estáticos (octubre, 1990), pruebas de bombeo en sondajes, estratigrafía del relleno, prospección geoeléctrica, etc.

El trabajo mencionado anteriormente realiza una modelación del sistema incluyendo la geología y geomorfología, descripción de zonas acuíferas y constantes elásticas de sistema de aguas subterráneas, como también los mecanismos de recarga y descarga de los cuatro valles que conforman la cuenca de Casablanca: Lo Ovalle, Lo Orozco, La Vinilla-Casablanca y Los Perales de Tapihue.

Para fines del presente trabajo se comparan los datos mencionados anteriormente pero solo del valle Los Perales de Tapihue, localidad en la cual se enfoca este estudio.

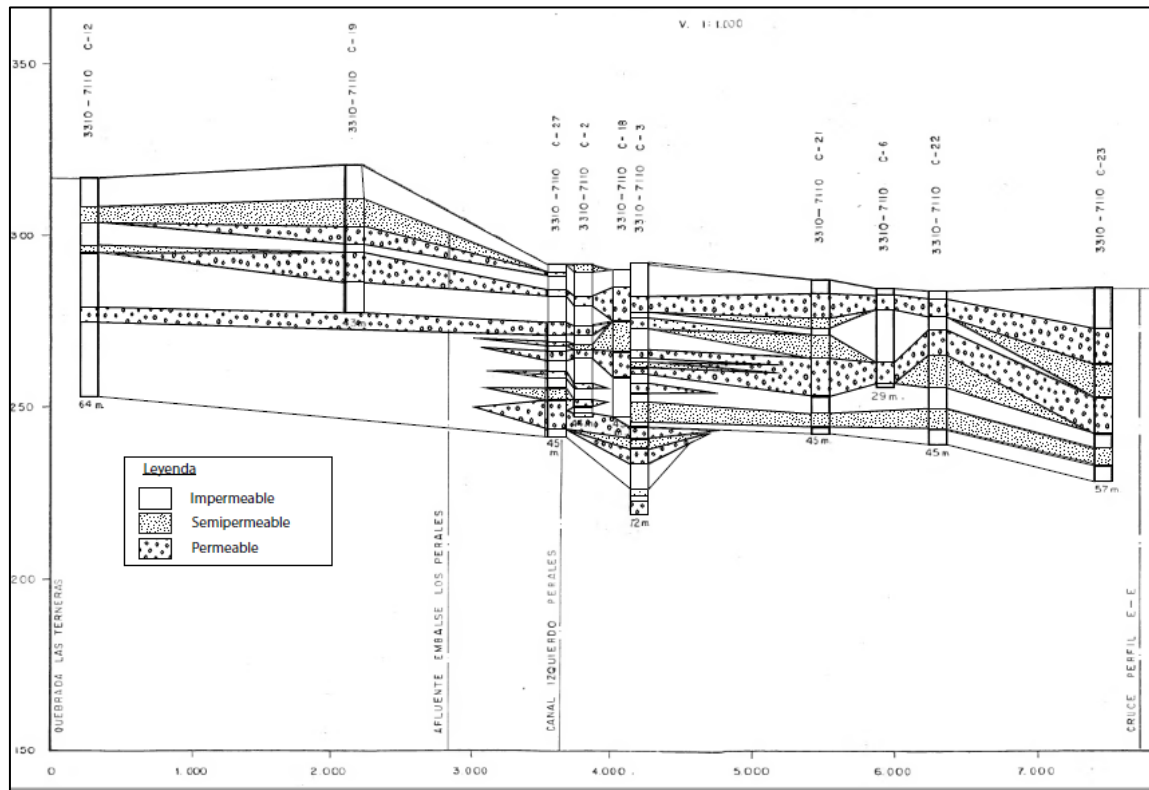
En el Anexo 1, en la Figura 29 se puede observar la traza del perfil estratigráfico B-B ubicado en el valle Los Perales de Tapihue, las columnas estratigráficas pertenecientes al perfil se muestran en la Figura 6, se realizó una modificación al perfil original para poder observar la disposición de los estratos (Figura 7)



**Figura 6.-** Columnas estratigráficas en el perfil B-B. G. Cabrera, 1991.

En la Figura 6 se pueden observar el perfil B-B hasta la intersección con el perfil E-E (ver Figura 29) y presenta 10 columnas estratigráficas de diferentes profundidades. En la Figura 7 se muestra el perfil con la disposición de los estratos. Posee un relleno sedimentario de naturaleza lenticular e intercalación de estratos semipermeables con estratos permeables de espesores que varían entre 5 y 10 metros, compuestas fundamentalmente por arenas gruesas y finas y algo de grava. Estas capas son subyacentes a un estrato superficial arcilloso e impermeable que dificulta la infiltración de aguas lluvias. Estos estratos confinarían las napas subterráneas, observándose napas libres sólo en

sectores de recarga de estas formaciones acuíferas (conos de deyección de las quebradas laterales)



**Figura 7.-** Perfil estratigráfico B-B. Modificado de G. Cabrera, 1991.

En cuanto a las constantes elásticas se utilizó el método de Jacob. Para el valle Los Perales se determinaron transmisividades entre 100 y 800  $\text{m}^2/\text{dia}$ , siendo las mayores en el centro del valle y las menores se circunscribe a una franja relativamente angosta que rodea al sector de mejores transmisividades (400-800  $\text{m}^2/\text{dia}$ ) como se observa en la Figura 30 del Anexo 1

Con respecto al coeficiente de almacenamiento se utilizaron los datos a obtenidos a partir de las pruebas de bombeo de gasto constantes con un pozo de observación cercano al de bombeo. Se determino un coeficiente de almacenamiento (S) de 0.00125 en la desembocadura del valle.

En el valle definen dos unidades hidrogeológicas. La primera corresponde a la zona sobre el embalse Los Perales, donde las formaciones acuíferas son de menos calidad con transmisividades hasta  $400 \text{ m}^2/\text{dia}$  y el segundo ubicado abajo del embalse, donde los rellenos alcanzan potencias superiores a los 70 metros, con transmisividades que ascienden hasta los  $800 \text{ m}^2/\text{dia}$  en la parte central, disminuyendo hacia la cercanía de los cerros.

Para las recargas del sistema se determinaron fundamentalmente pluviales, producto de la infiltración de las precipitaciones en las zonas altas, en los conos de deyección de las quebradas laterales y en los sectores de contacto roca-relleno. Otra fuente de recarga que se determinó fue la infiltración producto de los cauces naturales, esteros y embalses.

En cuanto a las descargas del acuífero la constituye la incorporación del agua subterránea a los cauces de escurrimiento superficial, el bombeo desde los pozos y la evapotranspiración.

Con respecto al balance hídrico, se obtuvo que el valle Los Perales fue el único en el cual se determinó un balance hídrico negativo dado su alto nivel de explotación con  $-7.726.320 \text{ m}^3/\text{año}$ .

### 3 GEOLOGÍA

#### 3.1 GEOLOGÍA DE SUB-SUPERFICIE

Para realizar el análisis de la geología de subsuperficie del valle Los Perales de Tapihue, se utilizaron las columnas estratigráficas elaboradas durante la construcción de obras de captación de aguas presentes en los expedientes de las solicitudes de derechos facilitados por la DGA. En total se lograron encontrar 26 columnas, en la Tabla 1 se muestra la lista de dichos documentos con el pozo asociado y la ubicación en UTM Datum WGS 84.

**Tabla 1.- Pozos utilizados para el análisis estratigráfico. Elaboración propia**

N° EXPEDIENTE	POZO	NOMBRE O RAZON SOCIAL	COORDENADAS UTM DATUM WGS 84	
			NORTE (m)	ESTE (m)
ND-0505-1684	P008	SOCIEDAD AGRICOLA Y SERV. LA ITALO BRITANICA S.A.	6311120	283546
ND-0505-2149	P016	SOCIEDAD AGRICOLA SANTA MARTA LIMITADA	6312920	284076
ND-0505-2150	P017	FELIPE LARRAÍN BASCUÑAN	6312230	283901
ND-0505-2151	P018	DANIEL SHACHNER ROIZBLATT	6312030	283576
ND-0505-2153	P019	SOCIEDAD AGRICOLA SANTA MARTA LIMITADA	6312460	284151
ND-0505-2154	P020	DANIEL SHACHNER ROIZBLATT	6312180	283351
ND-0505-2237	P021	INMOBILIARIA PRADO VERDE S.A.	6316405	286561
ND-0505-2643	P025	JORGE MONTT MUJICA	6313594	285522
ND-0505-2846	P029	JORGE MONTT MUJICA	6313620	285331
ND-0505-3075	P032	ALVARO RENCORET SILVA	6315756	288322
ND-0505-4258	P037	CARLOS HOLZMANN POISSON	6316344	288850
ND-0505-4258	P038	CARLOS HOLZMANN POISSON	6316490	289000
ND-0505-4628	P043	INMOBILIARIA PRADO VERDE S.A.	6316791	286487
ND-0505-4629	P044	INMOBILIARIA PRADO VERDE S.A.	6316280	285512
ND-0505-4630	P045	INMOBILIARIA PRADO VERDE S.A.	6316064	285549
ND-0505-4631	P046	INMOBILIARIA PRADO VERDE S.A.	6316547	287635
ND-0505-4872	P058	CRISTOPHER ALFONSO HOLZMANN KINTNER	6316573	289361
ND-0505-5415	P071	AGRICOLA LOS FRESNOS S.A.	6312697	284790
ND-0505-5911	P120	ALVARO RENCORET SILVA	6316084	288517
ND-0505-6266	P137	EUGENIO ARRAU MADRID	6312250	285990
ND-0505-6268	P139	EUGENIO ARRAU MADRID	6311534	286909
ND-0505-6269	P140	EUGENIO ARRAU MADRID	6311998	285935
ND-0505-1235	P173	EDMUNDO ELUCHANS URENDA	6309590	284901
ND-0505-2975	P175	SOCIEDAD AGRICOLA REBELS LTDA	6310430	282261
ND-0505-4871	P176	SOCIEDAD AGRICOLA Y DE INV. LA ITALO BRITANICA S.A.	6311120	282546
ND-0505-5331	P181	JORJE EDUARDO GUILLERMO VETTIGER LABRARA	6310915	284393



Las columnas estratigráficas de los expedientes no poseen heterogeneidad en la clasificación de los sedimentos presentes, dependen de las personas que describe el material durante la perforación, los tipos de sedimentos presentes en las columnas son los siguientes:

- |                        |                                 |
|------------------------|---------------------------------|
| • Arcilla              | • Arena media                   |
| • Arcillas de colores  | • Arena mediana                 |
| • Arcilla limosa       | • Arena gruesa                  |
| • Arcilla granulada    | • Arena maicillenta             |
| • Arcilla dura         | • Grava                         |
| • Arcilla densa        | • Maicillo                      |
| • Limo                 | • Gravilla                      |
| • Limo negro           | • Ripio                         |
| • Limo negro arcilloso | • Conglomerado        arcilloso |
| • Limo arcilloso       | arenoso                         |
| • Greda                | • Grava media                   |
| • Tosca                | • Maicillo fino                 |
| • Tierra vegetal       | • Maicillo con arcilla          |
| • Arena                | • Tosca con maicillo            |
| • Arena rubia          | • Maicillo con arena            |
| • Arenas arcillosas    | • Marcillo compactado           |
| • Arena fina           | • Piedras                       |

Debido a lo anterior se realizó una clasificación distinta a las columnas originales. Para esto se determinaron 4 grupos, los cuales varían tanto en granulometría como en proporción presente en los segmentos descritos y se exponen a continuación:

**Unidad Estratigráfica 1:** Capa compuesta solo por material fino (arcilla y limo) (Impermeable)

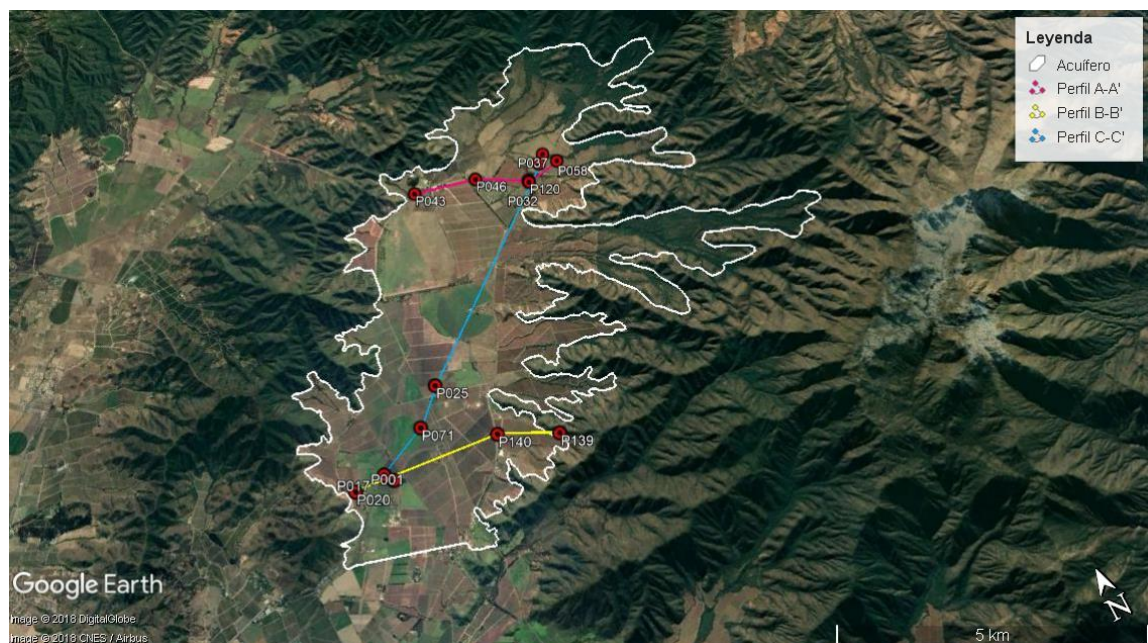
**Unidad Estratigráfica 2:** Contenido material fino varía entre un 40-90 % (Permeabilidad baja)

**Unidad Estratigráfica 3:** Contenido de material fino varía entre un 10-40 % (Permeabilidad media)

**Unidad Estratigráfica 4:** Capa compuesta solo por sedimento grueso como arenas y gravas (Permeabilidad alta)

### 3.1.1 Estratigrafía

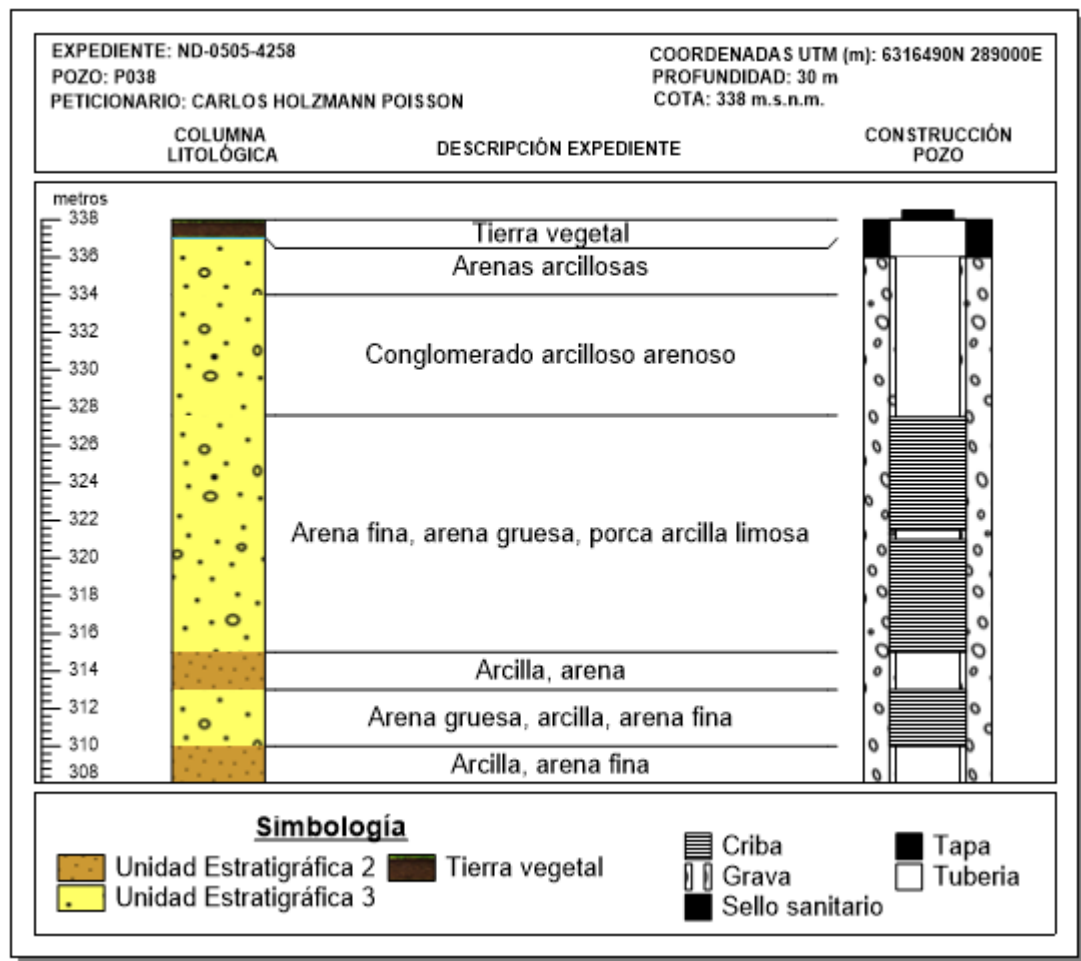
A partir de las columnas estratigráficas se realizaron 3 perfiles. Las trazas de estos perfiles están hechas con el fin de poder determinar variaciones en el subsuelo de la cuenca tanto de norte a sur como de este a oeste. (Figura 8)



**Figura 8.-** Mapa con los perfiles realizados. Modificado de Google Earth.

Se realizaron tres columnas para representar el sector norte, centro y sur del valle y ver la variación granulométrica. Dentro de estas figuras se muestra en número de expediente correspondiente a cada pozo, el código de este, las coordenadas en UTM, la cota a la cual está ubicado el pozo y la profundidad de este. Además, existen tres campos, el primero muestra la estratigrafía presente en el pozo, la segunda es la descripción original del expediente y la tercera es la es un esquema de la construcción del pozo, con la ubicación de las cribas y/o tubería ranurada.

En la Figura 9 se muestra la primera columna que pertenece a la zona norte y se generó a partir del pozo P038, en la base de la columna se encuentra una intercalación de 7 metros de potencia de arcillas y arena fina con una capa de arena gruesa, fina y arcilla, hacia el techo existe una capa de 23 metros de



**Figura 9.-** Columnas estratigráfica del pozo P038. Elaboración propia.

espesor, compuesto de material grueso principalmente como gravas y arena y en menor proporción arcillas y limo. Se puede observar a partir de esta columna que en la zona norte de la cuenca predomina la Unidad Estratigráfica 3 por sobre la Unidad Estratigráfica 2 y es en la primera en donde se encuentran colocadas las cribas del pozo, ya que a partir de estas capas se podría drenar de mejor manera el agua del acuífero debido a la mayor permeabilidad de este grupo.

La columna representativa del sector centro se observa en la Figura 10 y pertenece al pozo P025. En la base de esta columna existe una alternancia de 26 metros de potencia entre sedimento fino como arcilla y sedimento grueso como gravas y arenas. Sobreyacente a esto, con 8 metros de espesor existe una

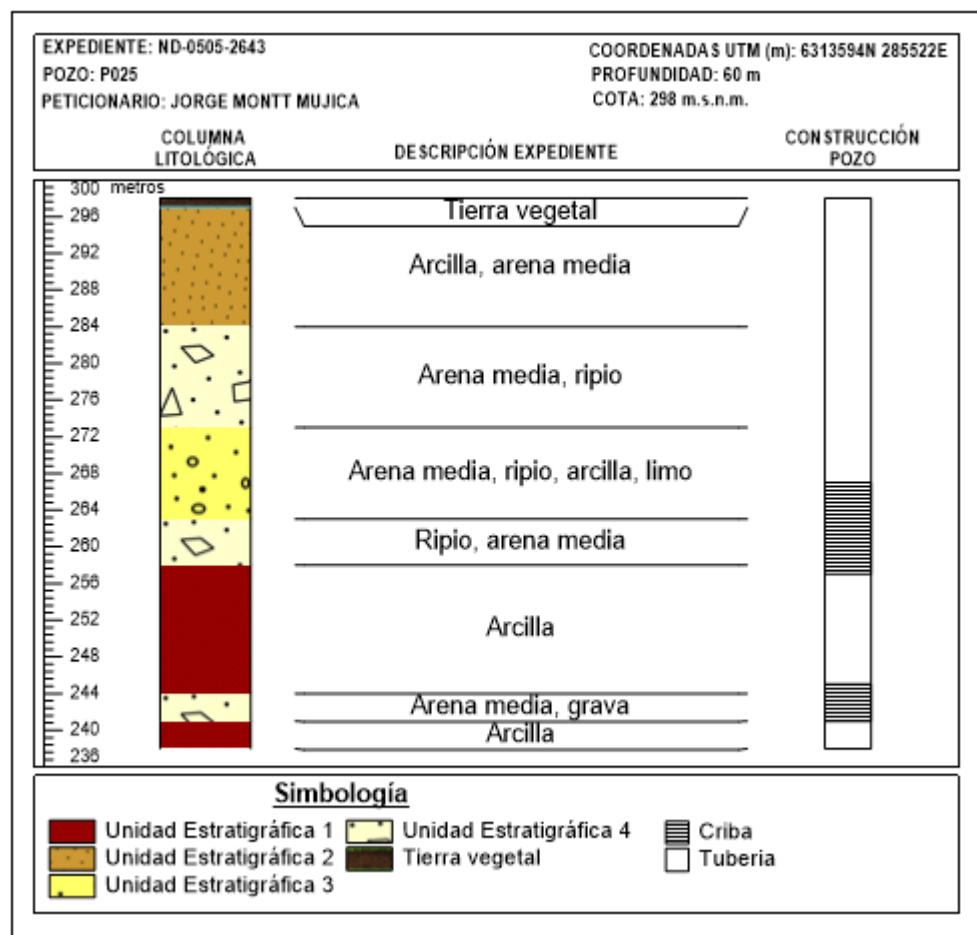


Figura 10.- Columnas estratigráfica del pozo P025. Elaboración propia.

capa de gravas con arenas y en menor proporción limo y arcilla. Sobre la capa anterior se observa un estrato de 12 metros de potencia de gravas y arena.

Finalmente, en el techo de la columna existe una capa de baja permeabilidad de 14 metros de espesor compuesta por arcilla principalmente con arena media.

Al igual que en la columna del pozo P038, las cribas están colocadas en los estratos de permeabilidad más alta como lo son las capas de la Unidad Estratigráfica 3 y Unidad Estratigráfica 4 para un mayor drenaje del agua.

Por ultimo, para representar la zona sur se escogió la columna del pozo P001 (Figura 11). Compuesta por una alternancia de 65 metros de espesor entre capas que varían el porcentaje de material fino como arcillas y limo, Cabe destacar que

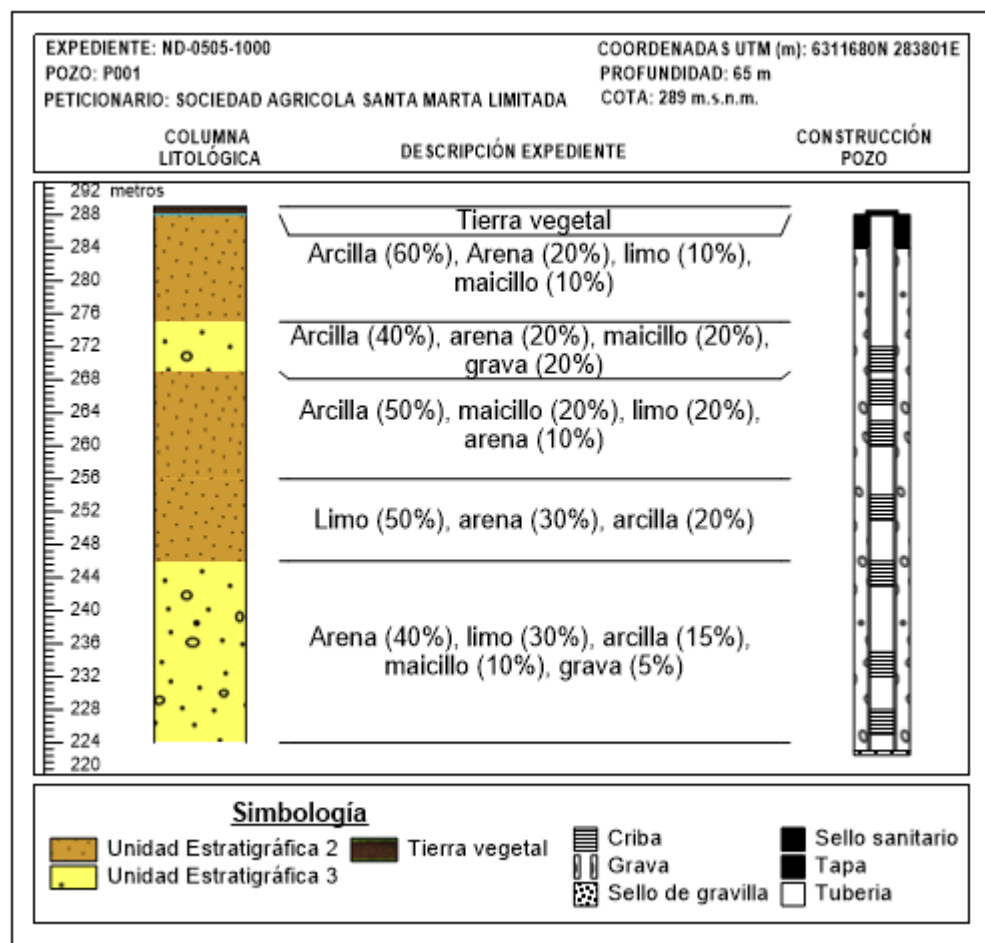


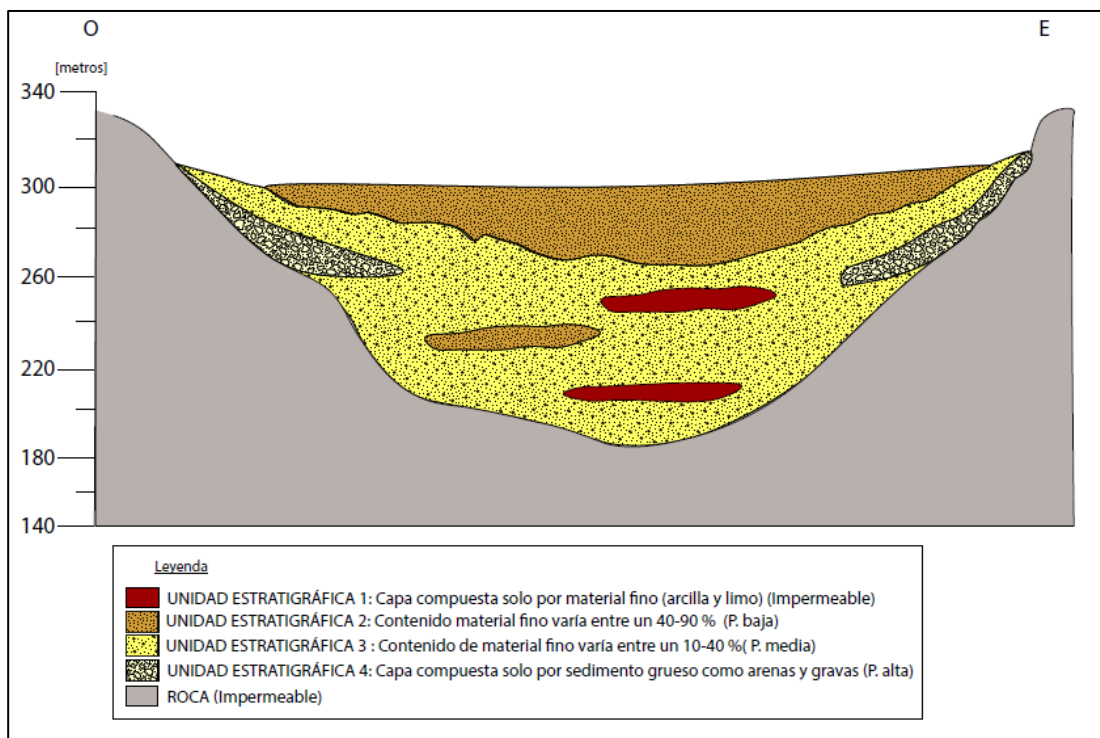
Figura 11.- Columna estratigráfica del pozo P001. Elaboración propia.

toda la columna está compuesta de gravas, arenas, limo y arcilla en pero en distintas proporciones. En este caso si bien las cribas están colocadas en ambas capas, la mayoría se encuentra en las de la Unida

d Estratigráfica 3 con una mayor permeabilidad que las de la Unidad Estratigráfica 2.

Según las descripciones anteriores existe una variación granulométrica a lo largo de la cuenca, en el sector norte, hacia la cabecera de la cuenca la granulometría en general es más gruesa, hacia el centro aparece un estrato superior de material más fino y menos permeable que se extiende hasta la zona sur.

En la Figura 12 se muestra un perfil tipo de la cuenca, realizado a partir de los perfiles estratigráficos de las Figuras 31-33 del Anexo 2 y se observa la capa superior de material fino de arcilla y limo principalmente, esta disminuye su espesor hasta desaparecer hacia la falda de los cerros, hacia esta zona existen capas de sedimento más grueso como gravas y arenas.



**Figura 12.-** Perfil esquemático del subsuelo. Elaboración propia.

Las capas inferiores corresponden a arenas principalmente y lentes de arcilla.

### **3.2 HIDROGEOLOGÍA**

Los datos hidrogeológicos se obtuvieron a partir de la estratigrafía descrita anteriormente en el presente trabajo o en el apartado anterior, las pruebas de bombeo de los distintos pozos obtenidos del catastro de captaciones de la DGA y a partir de información de trabajos anteriores para determinar parámetros que con los datos obtenidos no fue posible establecer.

#### *3.2.1 Unidades Hidrogeológicas*

A partir de la información de la sección de estratigrafía se determinaron las unidades hidrogeológicas de la cuenca. En total fueron tres unidades que se definen a continuación:

**Unidad Hidrogeológica 1:** La componen las capas que contienen un mayor porcentaje de material fino como limo y sobre todo arcilla. Esta unidad es capaz de almacenar agua, pero no de transmitirla por lo que su permeabilidad es baja

**Unidad Hidrogeológica 2:** La componen las capas que contienen un mayor porcentaje de sedimento grueso, como gravas y arenas. Es la unidad con mayor permeabilidad, puede almacenar y transmitir el agua, por esto es la más importante en lo que se refiere a aporte de agua subterránea.

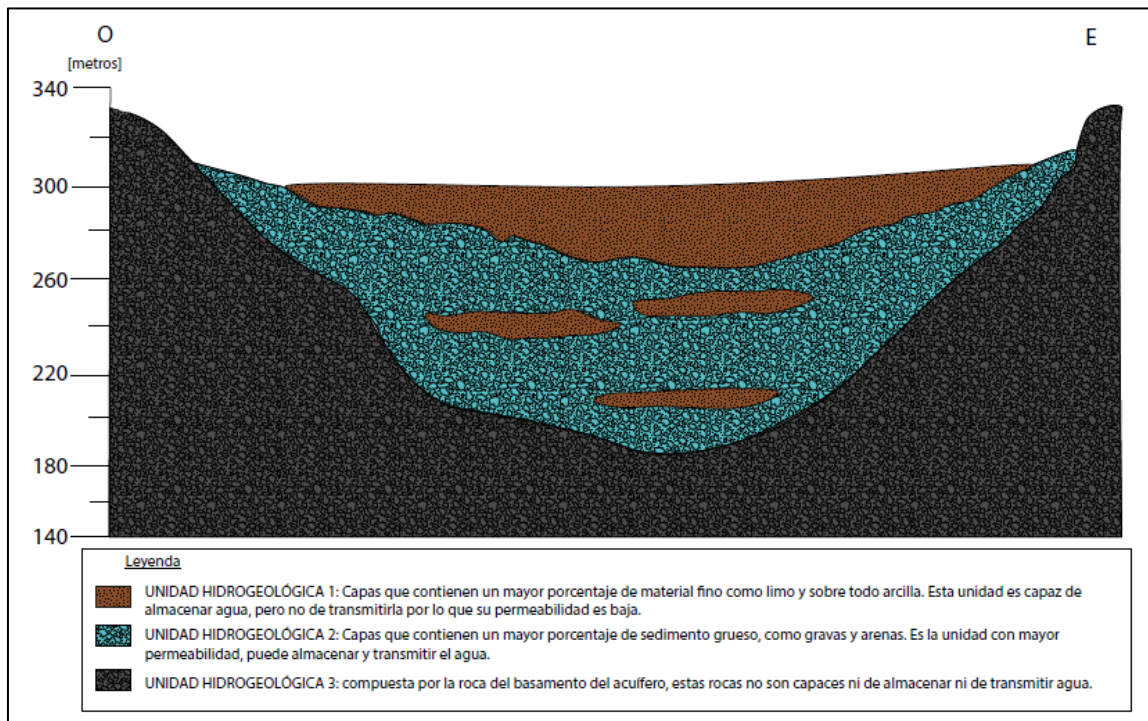
**Unidad Hidrogeológica 3:** Esta unidad está compuesta por la roca del basamento del acuífero, estas rocas no son capaces ni de almacenar ni de transmitir agua. Es una unidad impermeable que permite que el agua subterránea se mantenga dentro del acuífero y no escape hacia otras zonas.

A lo largo del valle la Unidad Hidrogeológica 1 se encuentra principalmente en la parte superior del acuífero y también como lentes dentro de la Unidad Hidrogeológica 2, como se mencionó anteriormente la Unidad Hidrogeológica 1 está compuesta en su mayoría por arcillas, pero su espesor disminuye hacia la cabecera de la cuenca y la ladera de los cerros lo que hace que este acuífero



tenga características de semiconfinado debido a que hacia estas zonas son áreas de recarga.

En la Figura 13 se puede observar un perfil esquemático que muestra la disposición de las unidades hidrogeológicas dentro del acuífero. Este esquema se realizó a partir del análisis de los perfiles Figuras 34-36 del Anexo 3, los cuales fueron realizados a partir de los perfiles de la Figura 8, estos muestran la disposición espacial de las unidades en el acuífero.

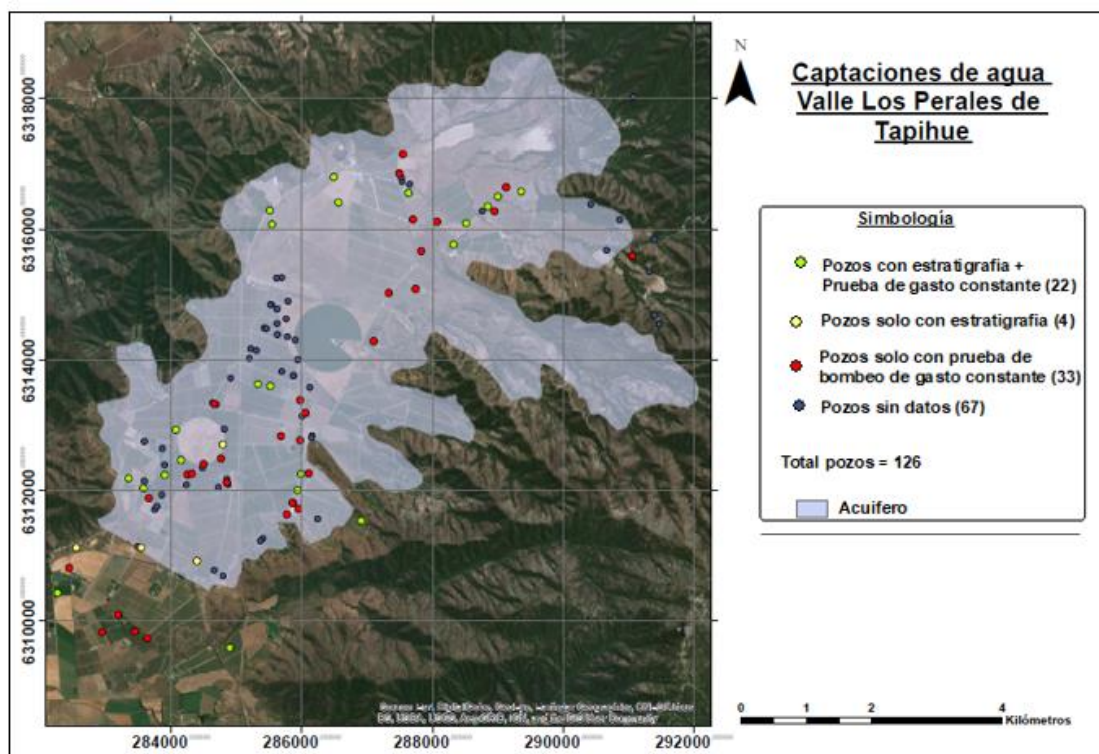


**Figura 13.-** Perfil esquemático de las unidades hidrogeológicas de la cuenca. *Elaboración propia*



#### 4 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA Y DEL ACUÍFERO

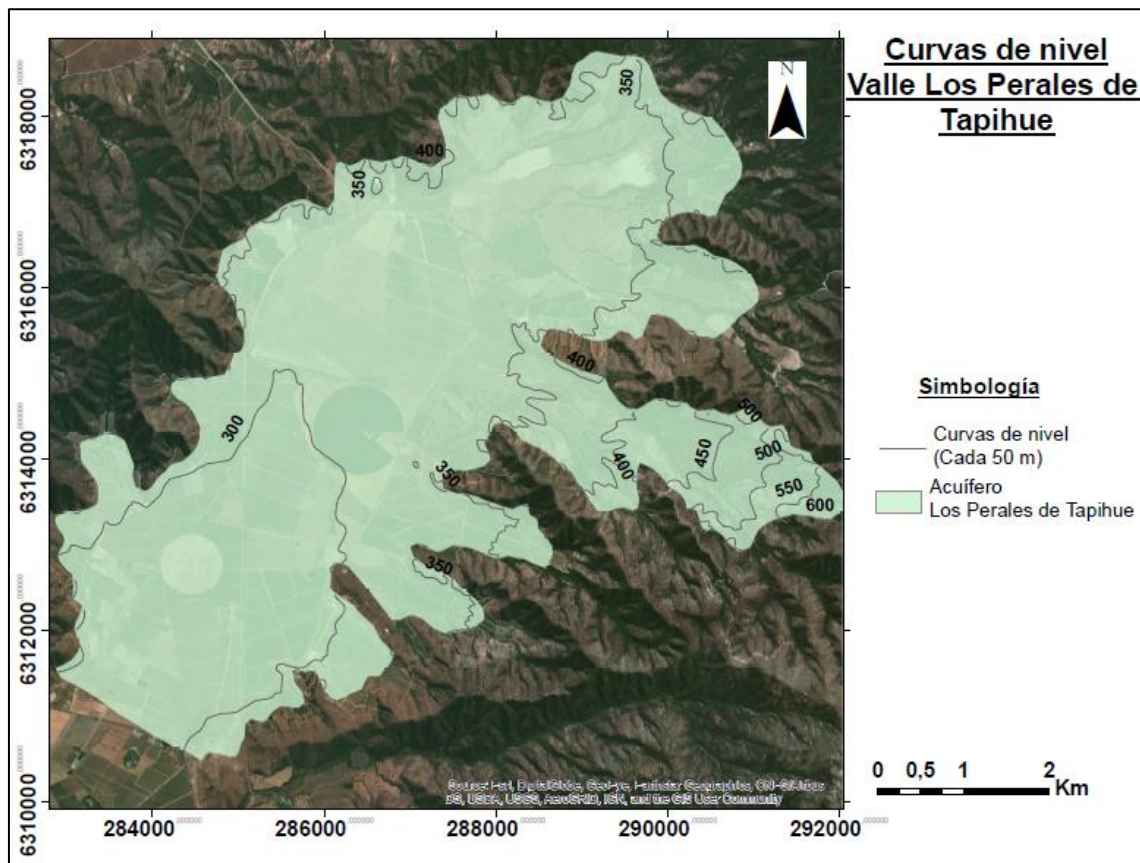
Para el estudio de las características de la cuenca y del acuífero, la determinación de los parámetros elásticos como la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento se usaron los datos obtenidos del catastro de pozos que se obtuvo de DGA. En la cuenca existe un total de 191 de ellos, existen 65 pozos que no tienen la ubicación, de los 126 restantes 67 no tienen información ni de pruebas de bombeo ni de estratigrafía, 33 pozos tienen datos solo de prueba de bombeo, 4 tienen solo información estratigráfica y 22 pozos tienen datos de pruebas de bombeo y estratigrafía. Esta distribución se encuentra presente en la Figura 14.



**Figura 14.-** Mapa con la distribución espacial de los pozos dentro del valle Los Perales de Tapihue y su respectiva información. Elaboración propia.

#### 4.1 MORFOLOGÍA DEL TERRENO

La morfología del terreno de la cuenca se muestra en la Figura 15, como se puede observar el terreno es más alto hacia el norte y el sector este, teniendo alturas máximas sobre los 350 en el primer sector y en el segundo alcanza los 600 m.s.n.m. La altura decrece hacia el sur con alturas bajo los 300 m.s.n.m. Pero en general el valle no posee pendientes abruptas con excepción del sector este donde se mencionó están las mayores alturas.

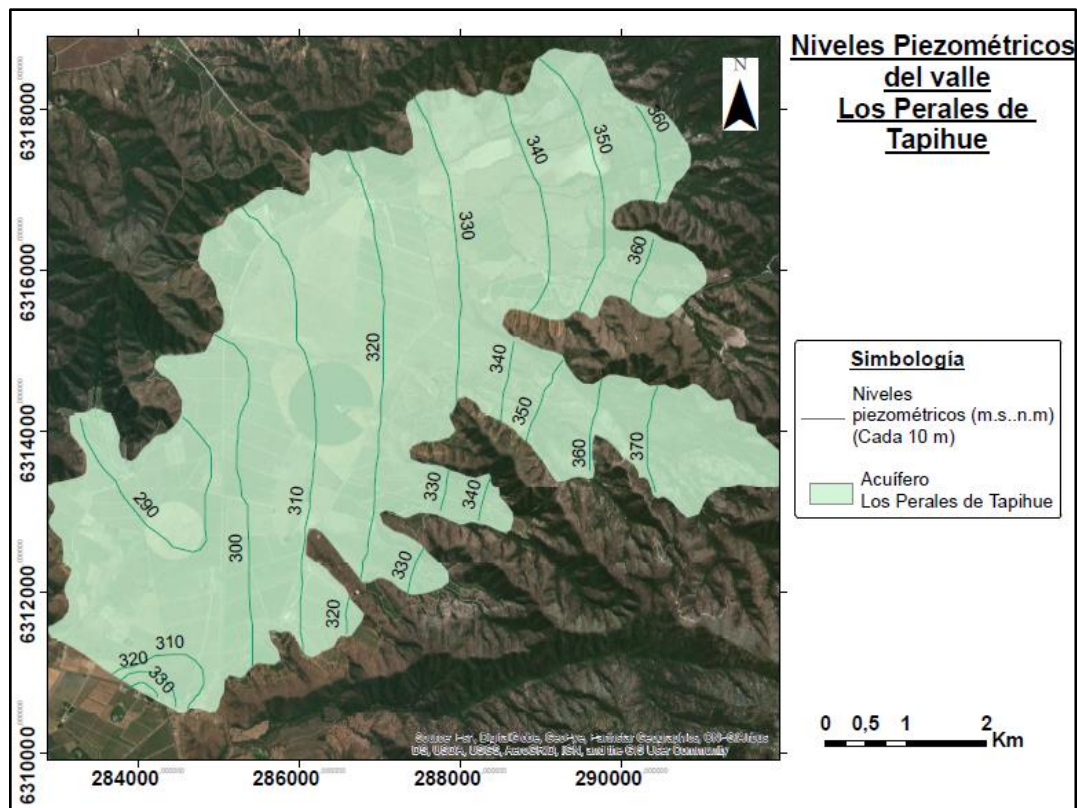


**Figura 15.-** Mapa topográfico cada 50 metros del valle Los Perales de Tapihue. Elaboración propia.

## 4.2 NIVELES ESTÁTICOS Y ESPESOR DEL ACUÍFERO

### 4.2.1 Niveles estáticos

A partir de la campaña de terreno realizada por la empresa Rizzos Associates Chile S.A. durante los meses de septiembre y octubre del año 2014, en la cuenca de Casablanca para el informe “Actualización de la modelación Hidrogeológica e integrada de los acuíferos de la cuenca del Estero Casablanca” se obtuvieron los datos de 52 pozos con sus respectivos niveles estáticos, los cuales se encuentran en la Tabla 11 del Anexo 4 y se realizó el mapa de la Figura 16 en el cual se puede observar que los niveles disminuyen hacia el sur y de este a oeste, misma situación que lo que ocurre con las cotas de nivel, pero en el sector sur se puede observar que los niveles piezométricos disminuyen hacia el noroeste. Esta situación podría deberse a un aumento en la extracción de aguas subterráneas lo que produce un descenso en los niveles en esa zona particular.

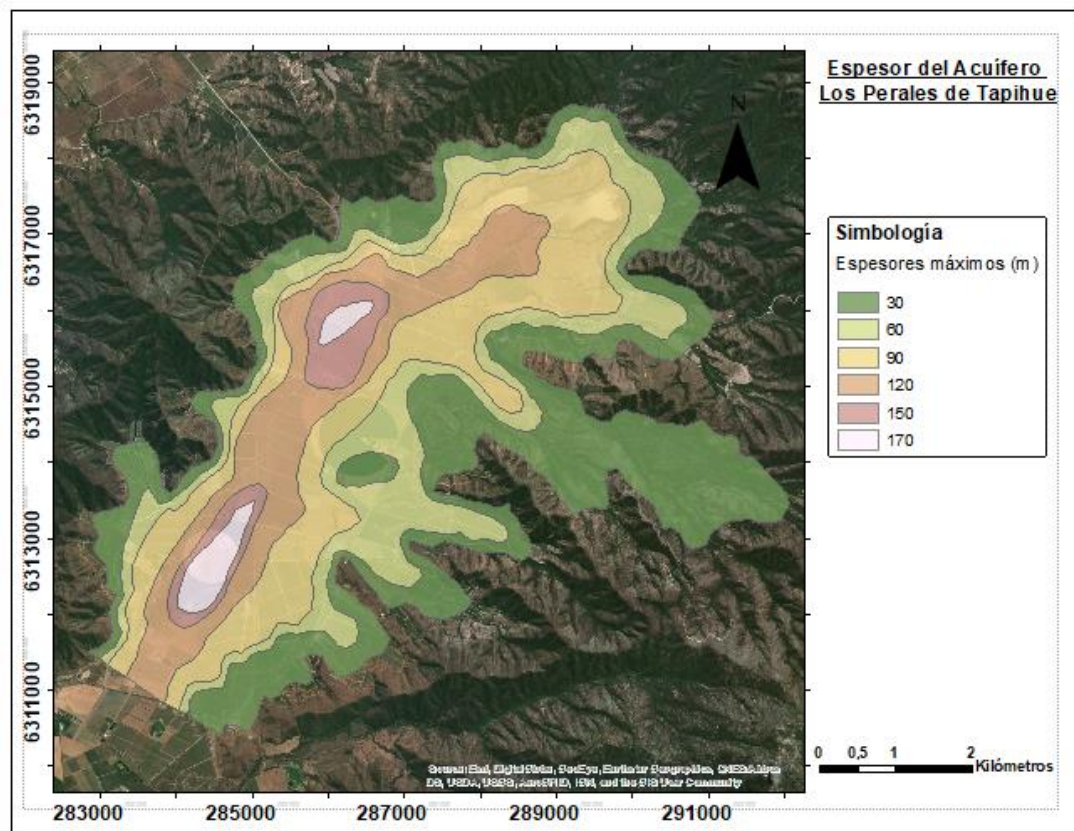


**Figura 16.-** Mapa de isopiezas, cada 10 metros del acuífero Los Perales de Tapihue. Elaboración propia.



#### 4.2.2 Espesor del acuífero

A partir de la prospección geofísica realizados por Geodatos S.A., en una campaña de noviembre del 2014 para el estudio “Actualización de la modelación Hidrogeológica e integrada de los acuíferos de la cuenca del estero de Casablanca” de la empresa Rizzos Associates Chile S.A. para la Dirección General de Aguas, se realizaron tres perfiles presentados en el Anexo 5 (Figuras 37-39), en los cuales se muestra el espesor del acuífero en diferentes secciones, con estos datos se construyó un mapa de espesores del acuífero presente en la Figura 17. Cabe destacar que estos espesores son los espesores máximos que hay en cada zona, estos van aumentando hacia el centro del acuífero. El espesor promedio es de 58 metros. Los valores están en la Tabla 12 del Anexo 4



**Figura 17.-** Mapa de espesores máximos para distintas secciones del acuífero. Elaboración propia.

### 4.3 CONSTANTES ELÁSTICAS

#### 4.3.1 Transmisividad ( $T$ )

La transmisividad se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unidad y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unidad a una temperatura fija determinada (Custodio y Llamas, 1996). Sus dimensiones son las de una velocidad por una longitud

$$T = K * b \quad (1),$$

Donde  $T$  es transmisividad ( $m^2/dia$ ),  $K$  es la conductividad hidráulica ( $m/dia$ ) y  $b$  es el espesor del acuífero ( $m$ )

En este caso para poder calcular la transmisividad ( $T$ ) se analizaron pruebas de gasto constante, extraídas desde los expedientes del catastro de peticiones otorgado por la DGA. Para esto se utilizó el software AquiferTest. Se utilizaron solo las pruebas de bombeo de los pozos que también tuviesen información estratigráfica con el fin de poder comparar la estratigrafía con la transmisividad. Se utilizó el método de Cooper-Jacob aplicando la Siguiete fórmula:

$$T = \frac{15.81 Q}{\Delta 2 - \Delta 1} \quad (2),$$

Donde  $Q$  es caudal constante bombeado ( $L/s$ ) y  $\Delta 2 - \Delta 1$  son los descensos para un ciclo logarítmico ( $m$ )

Se construyó el mapa de la Figura 18 en el cual se puede ver la transmisividad general de la zona, en el Anexo 4 se muestra la Tabla 12 con los pozos y la transmisividad correspondiente.

En el mapa se puede observar que las mayores transmisividades se encuentran en las zonas más próximas a las laderas de los cerros, esto es concordante con la estratigrafía, ya que como se mencionó en la sección de estratigrafía, la granulometría aumenta hacia esta zona y por lo tanto también lo hace la permeabilidad.

En general el acuífero tiene transmisividades correspondientes al intervalo de 100-1000, teniendo un promedio de 510 m<sup>2</sup>/dia. De acuerdo con estos valores y a la Tabla 2 correspondería a un acuífero de regular a bueno y permeable (Custodio y Llamas, 1983)

**Tabla 2.-** Clasificación del acuífero según transmisividad (Custodio y Llamas, 1996)

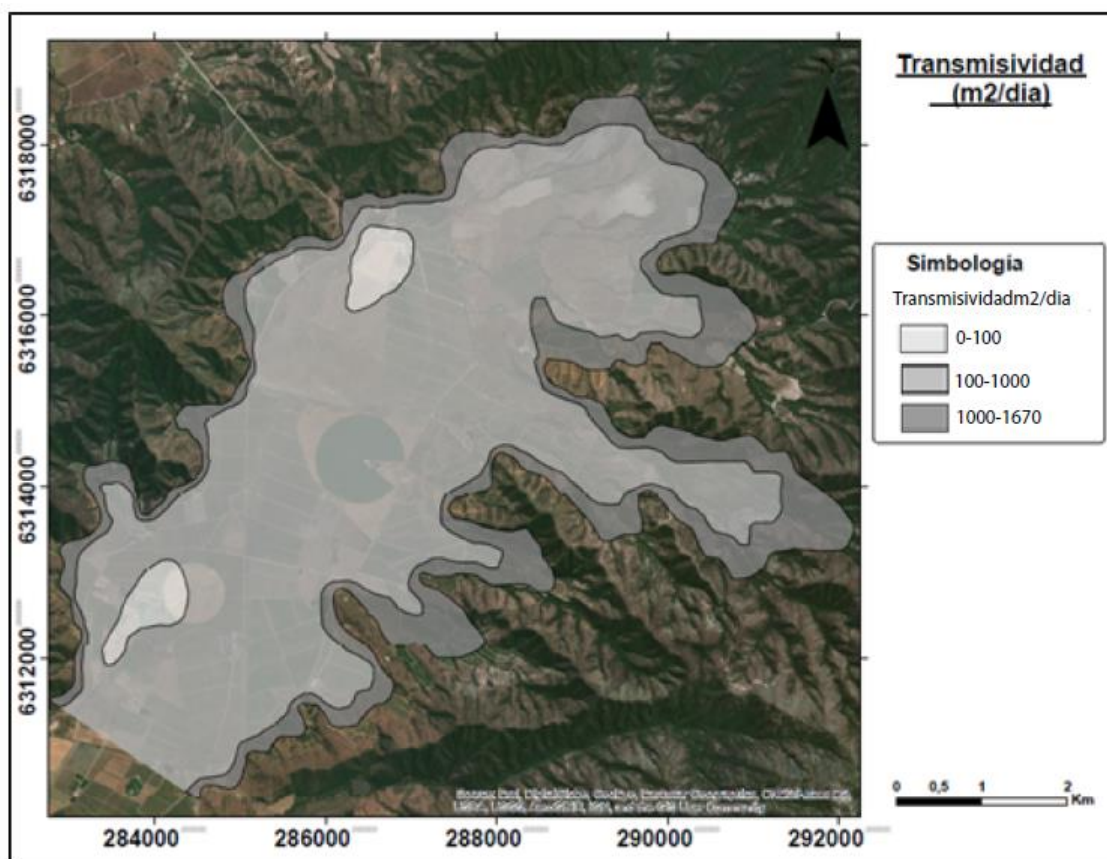
Transmisividad ( $\frac{m^2}{día}$ )	<div> <div>10<sup>0</sup></div> <div>10<sup>1</sup></div> <div>10<sup>2</sup></div> <div>10<sup>3</sup></div> </div>				
Calificación	Impermeables	Poco permeable	Algo permeable	Permeable	Muy permeable
Calificación del acuífero	Sin acuífero	Acuífero muy pobre	Acuífero pobre	Acuífero de regular a bueno	Acuífero excelente
Tipo de materiales	Arcilla compacta, Granito	Limo arenoso, Limo, Arcilla limosa	Arena fina, Arena limosa	Arena limpia, Grava y arena. Arena fina	Grava limpia

#### 4.3.2 Permeabilidad o conductividad hidráulica (K)

La conductividad hidráulica se define como el caudal que pasa por una sección unidad del acuífero bajo un gradiente también unidad a temperatura fija o determinada (Custodio y Llamas, 1996). Tiene dimensiones de una velocidad.

Como vimos en la ecuación (1), la transmisividad es el producto entre el coeficiente de almacenamiento y el espesor del acuífero, por lo tanto, despejando esa ecuación se obtiene la siguiente

$$K = \frac{T}{b} \quad (3),$$



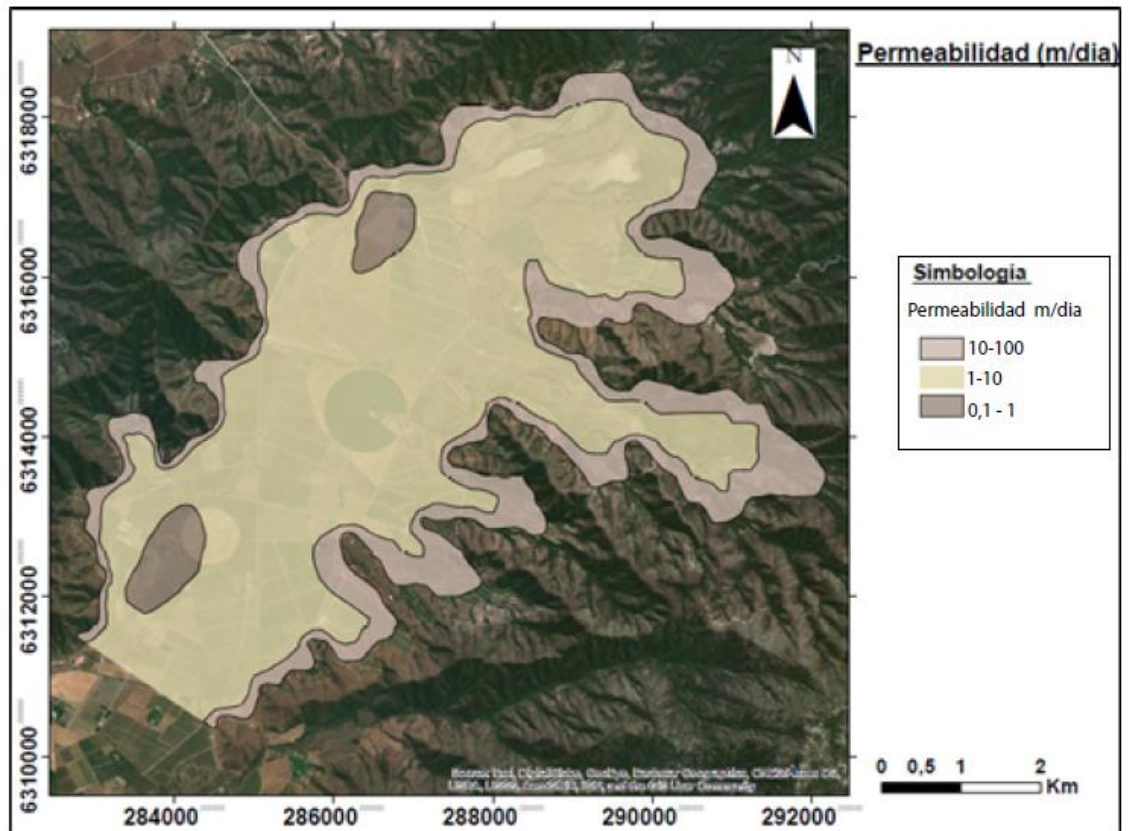
**Figura 18.-** Mapa de transmisividades. *Elaboración propia*

Utilizando esta fórmula se determinaron las diferentes permeabilidades del acuífero, los resultados se encuentran en la Tabla 12 del Anexo 4 y en la Figura 19 se puede ver el mapa de permeabilidad.

Las permeabilidades del acuífero varían entre 0.36 y 38.33 m/día, siendo el promedio 5.07 m/día. Según la clasificación de Custodio y Llamas (1996) que se muestra en la Tabla 3 este sería un buen acuífero con un buen drenaje y en sectores específicos sería clasificado como un acuífero pobre.

**Tabla 3.-** Clasificación del acuífero según la permeabilidad (Custodio y Llamas, 1996)

Permeabilidad ( $\frac{m}{\text{día}}$ )	<div><div>10<sup>4</sup></div><div>10<sup>3</sup></div><div>10<sup>2</sup></div><div>10<sup>1</sup></div><div>10<sup>0</sup></div><div>10<sup>-1</sup></div><div>10<sup>-2</sup></div><div>10<sup>-3</sup></div><div>10<sup>-4</sup></div><div>10<sup>-5</sup></div><div>10<sup>-6</sup></div></div>										
Tipo de terreno	Grava limpia	Arena limpia; mezcla de grava y arena		Arena fina; arena arcillosa; mezcla de arena, limo y arcilla; arcillas estratificadas				Arcillas no meteorizadas			
Calificación	Buenos acuíferos			Acuíferos pobres					Impermeables		
Capacidad de drenaje	Drenan bien				Drenan mal			No drenan			



**Figura 19.-** Mapa de permeabilidad. Elaboración propia



#### 4.3.3 Coeficiente de Almacenamiento (S)

El coeficiente de almacenamiento se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero de sección igual a la unidad y altura a la del acuífero saturado si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico o de carga hidráulica, es adimensional (Custodio y Llamas, 1996).

Para el cálculo de este parámetro en pruebas de bombeo se utiliza el método de Theis con la siguiente fórmula:

$$S = \frac{4Ttu}{r^2} \quad (4),$$

Donde S es el coeficiente de almacenamiento (adimensional), T es transmisividad ( $m^2/dia$ ), t es el tiempo de bombeo para el cual se genera el descenso ( $dias$ ), u es un parámetro adimensional y r es la distancia entre el pozo de bombeo y el pozo de observación (m). Según el método de Cooper-Jacob:

$$S = \frac{0.00156Tt_0}{x^2} \quad (5),$$

Donde  $t_0$  es el tiempo que se determina al extrapolar la recta hasta cortar la abscisa correspondiente al descenso 0 ( $dia$ ), y  $x^2$  es la distancia entre el pozo de observación y el pozo de bombeo (m),

Para las pruebas de bombeos estudiadas en este trabajo no existían pozos de observación, por lo tanto, no fue posible determinar un coeficiente de almacenamiento, pero trabajos anteriores y bibliografía establecen que para este acuífero en particular puede variar entre 0.035 y 0.00125. Según Custodio y Lamas (1996), este parámetro en acuíferos confinados varía entre  $10^{-3}$  y  $10^{-5}$ . En el estudio denominado “Modelación del sistema de aguas subterráneas del valle de Casablanca” de 1993 realizado por AC Ingenieros Consultores los valores del coeficiente de almacenamiento de  $1.25 \times 10^{-3}$ . En el estudio del Departamento de Estudios y Planificación (DEP) de diciembre de 2004

denominado “Modelación Hidrogeológica Valle del Estero de Casablanca” se determinó un coeficiente de almacenamiento que varía de 0.005 para la zona norte y 0.035 para la zona sur.

Como este acuífero tiene características de semiconfinado se lo otorgará un coeficiente de almacenamiento dentro del rango de  $10^{-3}$  y  $10^{-4}$

#### 4.4 DIRECCIÓN DE FLUJO

La dirección de flujo depende de la energía que tenga el agua subterránea y esta va desde los puntos de mayor a menor energía. Para poder determinar esto hay que establecer el gradiente hidráulico, el cual indica la dirección en la que se produce el máximo cambio de energía entre dos equipotenciales y es perpendicular a estas, ya que sigue el camino más corto (Alfaro, Santos y Castaño, 2000). Según la Ley de Darcy

$$\vec{v} = -K i \quad (8),$$

Donde  $v$  es el vector velocidad (L/T) e  $i$  es el gradiente hidráulico (adimensional) son paralelos entre sí, por lo que la velocidad también será perpendicular a las equipotenciales. Para determinar el gradiente hidráulico se utilizó la siguiente fórmula:

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (9),$$

donde,  $\Delta h$  es la diferencia de potencial hidráulico (L), representado por la diferencia entre una equipotencial y otra y  $\Delta l$  es la distancia entre ambas equipotenciales (L).

Además, se sabe que

$$v = \frac{Q}{A} \quad (10),$$

Donde Q es el caudal subterráneo (V/T) y A es el área de la sección por la cual pasa el flujo ( $L^2$ ). Si igualamos las ecuaciones (8) y (10) obtenemos:

$$K i = \frac{Q}{A} \quad (11),$$

Al mismo tiempo sabemos que

$$A = a b \quad (12),$$

Donde,  $a$  es la longitud de la sección atravesada (L) y  $b$  es el espesor del acuífero (L), reemplazando la ecuación (12) en la (11) y despejando Q resulta:

$$Q = K a b i \quad (13),$$

Y reemplazando la ecuación (1) en la (13) finalmente obtenemos

$$Q = T a i \quad (14),$$

A partir de esta ecuación se determinó la dirección de flujo, el acuífero fue dividida en secciones, cuyos valores se encuentra en la Tabla 13 del Anexo 4 y el flujo va desde las zonas con mayor caudal a las de mayor a menor Q. El mapa final se muestra en la Figura 20, la dirección del flujo avanza desde la cabecera de la cuenca hacia el suroeste y a su vez en el sector más bajo de la cuenca existe un flujo con dirección ascendente hacia el noroeste el cual converge en la misma zona con los otros flujos, contrario a como se esperaría que el flujo continuara su camino descendente hacia la desembocadura en el extremo sur del acuífero.

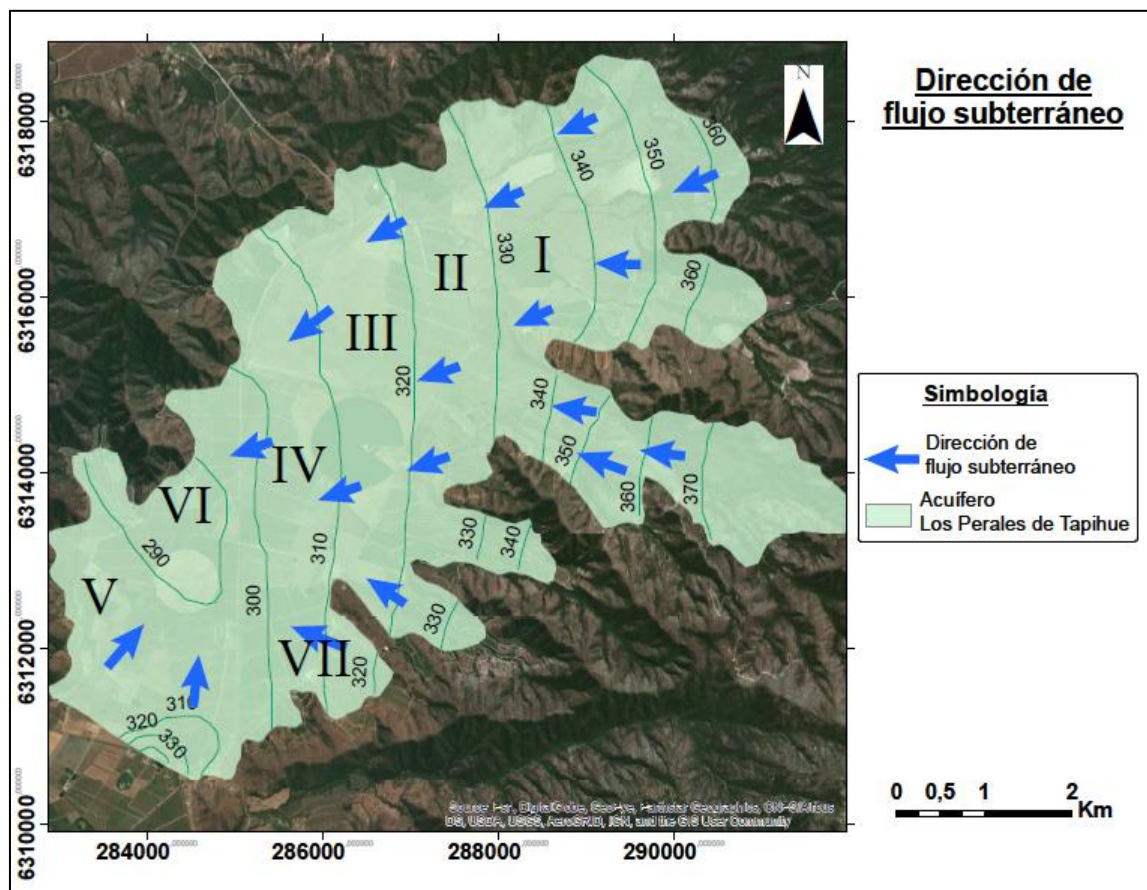


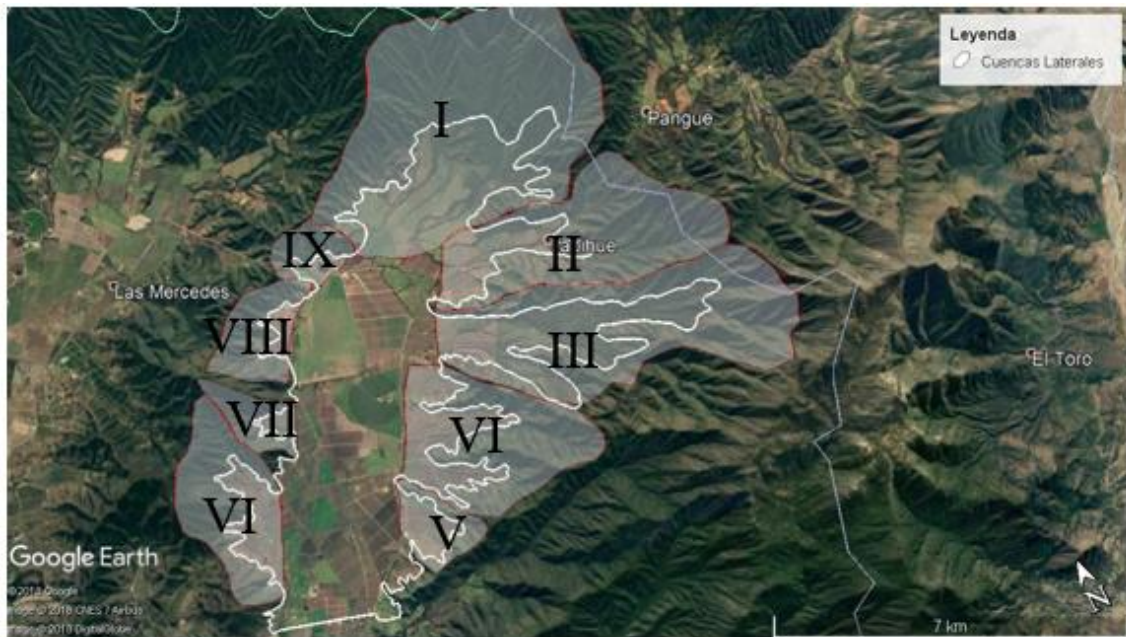
Figura 20.- Mapa de dirección de flujo subterráneo. Elaboración propia

## 5 BALANCE HÍDRICO

Se realizó el balance hídrico de la zona para el año 2017, por lo tanto, los datos utilizados son los correspondientes a ese año en particular y fueron facilitados por AGROMET, ocupando la información de la estación meteorológica Ventisquero-Tapihue ubicada dentro de la cuenca, por lo que no fue necesario extrapolar los datos con otra estación más lejana.

### 5.1 ENTRADAS

En la cuenca estudiada no existen actualmente recargas por escorrentía superficial, por lo tanto la única fuente de recarga es la precipitación, pero como vimos anteriormente este acuífero estaría semiconfinado por una capa de baja permeabilidad y la zona de recarga serían hacia las laderas de los cerros, estas zonas son denominadas cuencas laterales y se establecieron 9 para la zona estudiada y se muestran en el mapa de la Figura 21



**Figura 21.-** Mapa de distribución de cuencas laterales. Modificada de Google Earth

### 5.1.1 Precipitaciones

En la Tabla 4 se presenta las precipitaciones pluviales totales para cada mes y el total en el año, en total en la cuenca caen 267.2 mm anualmente o lo que es igual a 0.2672 m/año.

**Tabla 4.-** Precipitaciones totales por mes (mm). Elaboración propia

Meses	Precipitaciones (mm)
Enero	0,2
Febrero	0,0
Marzo	0,0
Abril	5
Mayo	56,8
Junio	100,2
Julio	21,8
Agosto	58,2
Septiembre	0,0
Octubre	20,0
Noviembre	5,0
Diciembre	0,0
Total	267,2

## 5.2 SALIDAS

Para las salidas de agua se estimó la demanda hídrica de la vegetación nativa, la cual se encuentra principalmente en la zona de las cuencas laterales y el caudal extraído artificialmente.

### 5.2.1 Evapotranspiración real (ETR)

Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó el método de la evapotranspiración de Turc a través de la siguiente fórmula:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (15),$$

Donde  $ETR$  es la evapotranspiración real para la vegetación nativa (mm/año),  $P$  es la precipitación (mm/año),

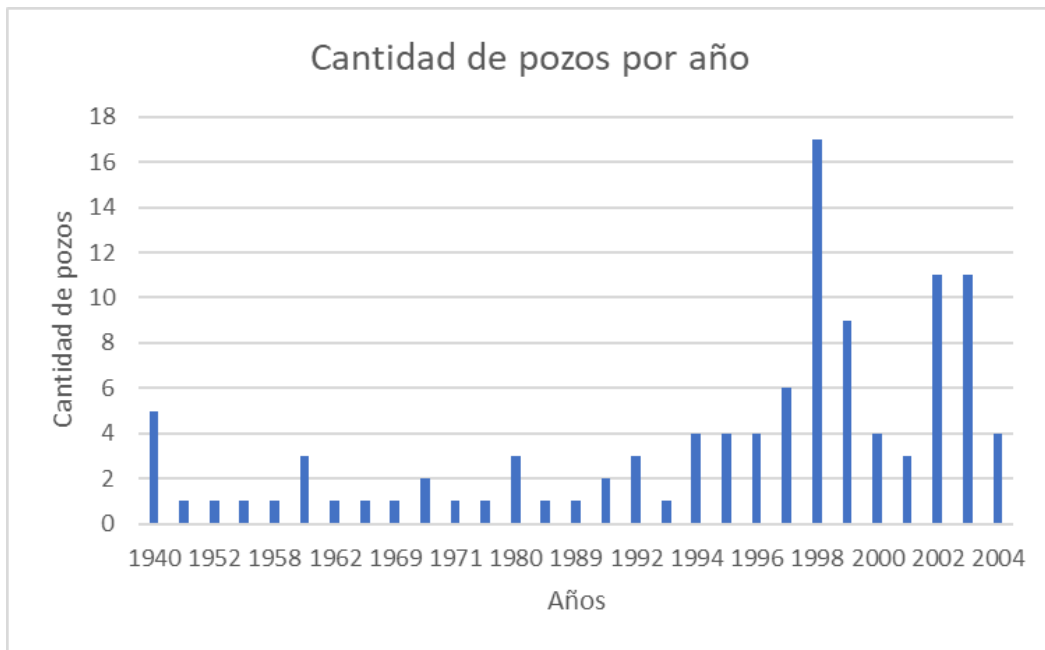
$$L = 300 + 25t + 0.005t^3 \quad (16),$$

donde  $t$  es temperatura media anual (°C).

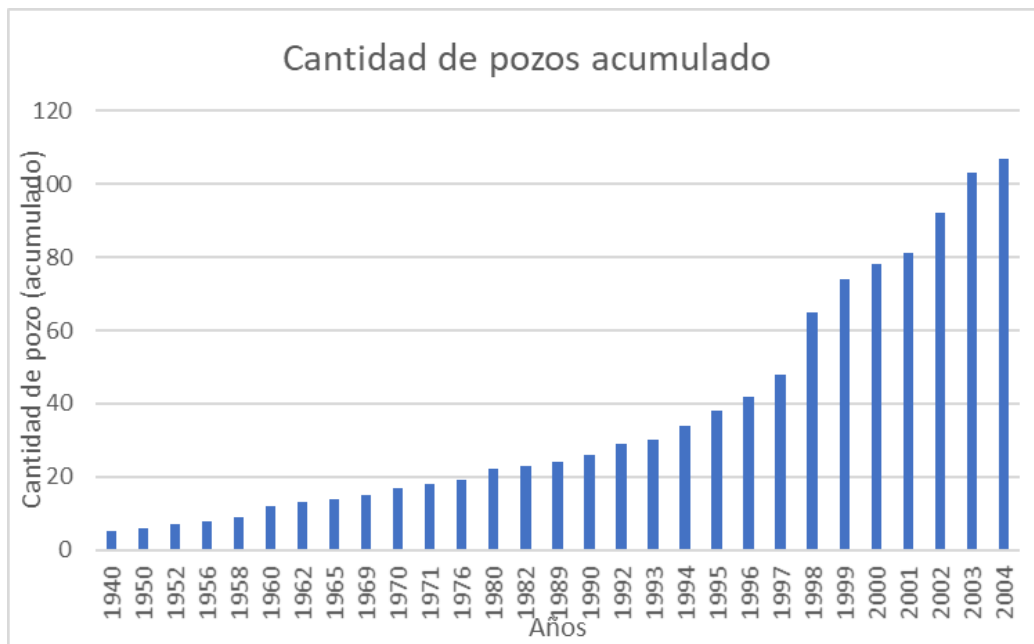
Como vimos anteriormente las precipitaciones anuales fueron 267,2 mm/año, los datos de la temperatura se obtuvieron a partir de la estación meteorológica Ventisquero-Tapihue cuyo promedio fue de 13,2 °C. Reemplazando los datos se obtiene una evapotranspiración real de 257,9 (mm/año)

#### 5.2.2 *Demanda artificial*

El sector en estudio se caracteriza por ser una zona en donde predominan las viñas, es por esto que la demanda de agua es alta y con los años esta ha ido en aumento, como se puede observar en los gráficos de las Figuras 22 y 23. En el primero se puede observar la cantidad de pozos que se han construido año a año, el año 1998 es el año con mayor pozos construidos, esto pudo deberse a que el año anterior fue un año muy lluvioso por lo que el acuífero tuvo una mayor disponibilidad de agua para su uso, lo mismo pudo haber ocurrido para explicar el alza de construcción de pozos para el año 2002 y 2003 debido a que el año 2001 también fue uno de los más lluviosos (Figura 3). En el segundo gráfico se presenta la construcción de pozos, pero acumulado, esto quiere decir que cada año muestra la cantidad total de pozos que se han construido hasta ese momento y se aprecia que ha habido un aumento sostenido en la construcción de estas captaciones.



**Figura 22.-** Cantidad de pozos construidos por año. *Elaboración propia*



**Figura 23.-** Cantidad de pozos acumulados por año. *Elaboración propia*



En la Tabla 5 se muestra la demanda antrópica, representada por los caudales otorgados por la DGA, el mayor porcentaje está concentrado en el uso para el riego, los que no tienen información sobre el uso se asociaron al riego, debido a que en la zona no existen zonas mayormente pobladas en comparación con el área plantada por los viñedos. El total de caudal otorgado fueron 1.636 L/s.

**Tabla 5.- Caudales otorgados. Elaboración propia**

Uso	Caudal solicitado (L/s)	Caudal otorgado (L/s)	Caudal otorgado (m <sup>3</sup> /año)	Porcentaje (%)
Riego	1.058	561	17.307.680	34,3
Otros	6	0	0	0,0
Potable	4	4	132.780	0,3
Sin información	1.618	1.071	33.077.585	65,5
Total	2.687	1.636	50.518.044	100,0

## 5.3 RESULTADOS

### 5.3.1 Recarga

La recarga del acuífero fue calculada a partir de dos métodos, uno fue utilizar la diferencia entre las precipitaciones y la evapotranspiración real y el segundo método fue utilizando la fórmula empírica para el cálculo de infiltración en Casablanca según el informe realizado por la Comisión Nacional de Riego del año 1983 denominado “Proyecto Maipo: Estudio hidrológico e hidrogeológico, modelos geológicos”

#### 5.3.1.1 Método 1

Para el cálculo de la infiltración se calculó la diferencia entre las precipitaciones (mm/año) y la evapotranspiración real calculada en las salidas (ver Tabla 6)

$$\text{Precipitación} - \text{ETR} = \text{Infiltración (17),}$$

$$267,2 - 257,9 = 9,3 \text{ mm/año o } 0,0093 \text{ m/año}$$

**Tabla 6.- Recarga según cuencas laterales y área total de la cuenca para el método 1. Elaboración Propia**

Cuenca lateral	Area total (m <sup>2</sup> )	Recarga por cuenca (m <sup>3</sup> /año)	Recarga por cuenca (L/s)
I	17.832.203	165.664	5,3
II	9.029.732	83.888	2,7
III	11.503.121	106.866	3,4
IV	7.734.808	71.858	2,3
V	1.777.786	16.516	0,5
VI	4.658.502	43.278	1,4
VII	1.252.578	11.637	0,4
VIII	2.160.894	20.075	0,6
IX	1.344.140	12.487	0,4
Total	57.293.764	532.268	16,88

#### 5.3.1.2 Método 2

Para el cálculo de la infiltración se utilizó la fórmula de la ecuación 18 extraída del estudio de la Comisión Nacional de Riego del año 1983 para la cuenca de Casablanca

$$I = 0,7 (P - 60\text{mm}) \text{ (18),}$$

Donde I es infiltración mensual (mm) y P son las precipitaciones mensuales (mm), según esta fórmula se infiltra un 70% del agua caída para los meses que precipiten más de 60 mm, de la Tabla 4 se desprende que sólo el mes de junio cumple con esto (100,2 mm), reemplazando en la fórmula se obtiene:

$$I = 0,7 (100,2 - 60)$$

$$I = 28,14 \text{ mm/mes}$$

Como existe infiltración solo un mes en el año, este será el total de recarga para el balance hídrico, como se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 7.-** Recarga según cuencas laterales y área total de la cuenca para el método 2. Elaboración Propia

Cuenca lateral	Area total (m <sup>2</sup> )	Recarga por cuenca (m <sup>3</sup> /año)	Recarga por cuenca (L/s)
I	17.832.203	501.798	15,9
II	9.029.732	254.097	8,1
III	11.503.121	323.698	10,3
IV	7.734.808	217.657	6,9
V	1.777.786	50.027	1,6
VI	4.658.502	131.090	4,2
VII	1.252.578	35.248	1,1
VIII	2.160.894	60.808	1,9
IX	1.344.140	37.824	1,2
Total	57.293.764	1.612.247	51,12

### 5.3.2 Descargas

#### 5.3.2.1 Demanda por vegetación nativa

Para la demanda por vegetación nativa se calculó la evapotranspiración total para cada cuenca lateral y por ende para el área total, lo que da como resultado una ETR 468,6 L/s

#### 5.3.2.2 Demanda antrópica

Para la demanda antrópica (Tabla 9) se consideró que durante un año se riegan las plantaciones un total de 10 horas diarias, durante los 30 días del mes en 6 meses del año, lo que da un factor de uso de un 20%, por lo tanto, la demanda antrópica se calculó como se muestra en la ecuación 19

$$\text{Demanda antrópica} = \text{Caudal otorgado (L/s)} \times 0,2 \text{ (19)}$$

**Tabla 8.-** Evapotranspiración real para las cuencas lateral y el área total. Elaboración propia.

Cuenca lateral	Área total (m <sup>2</sup> )	Demanda vegetación (m <sup>3</sup> /año)	Demanda vegetación (L/s)
I	17.832.203	4.599.101	145,84
II	9.029.732	2.328.857	73,85
III	11.503.121	2.966.768	94,08
IV	7.734.808	1.994.883	63,26
V	1.777.786	458.508	14,54
VI	4.658.502	1.201.473	38,10
VII	1.252.578	323.052	10,24
VIII	2.160.894	557.316	17,67
IX	1.344.140	346.667	10,99
Total	57.293.764	14.776.625	468,6

**Tabla 9.-** Demanda antrópica total, considerando un factor de uso de 20%. Elaboración propia

Caudal otorgado (m <sup>3</sup> /año)	Caudal otorgado (L/s)	Factor de uso de agua para la agricultura	Caudal otorgado (m <sup>3</sup> /año)	Caudal otorgado (L/s)
51.529.824	1.634	0,2	10.305.965	326,8

#### 5.4 BALANCE HÍDRICO

Durante este capítulo se ha expuesto los valores de las recargas y las descargas del acuífero, con esto es posible determinar el balance hídrico del acuífero a través de la ecuación de continuidad

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = Q_E - Q_s \text{ (20),}$$

Donde  $\Delta s$  es la variación de almacenamiento con respecto al tiempo  $\Delta t$ ,  $Q_E$  es el caudal de salida y  $Q_s$  el caudal de salida.

Reemplazando los valores obtenidos para las recargas calculadas a partir del método 1 y las descargas se obtiene:

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = 16,9 \left( \frac{L}{s} \right) - [468,6 \left( \frac{L}{s} \right) + 326,8 \left( \frac{L}{s} \right)]$$

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = -778,5 \left( \frac{L}{s} \right) \text{ o } -24.550.321 \frac{m^3}{año},$$

Para el caso de las recargas calculadas partir del método2, utilizando la fórmula empírica de la CNR se obtiene:

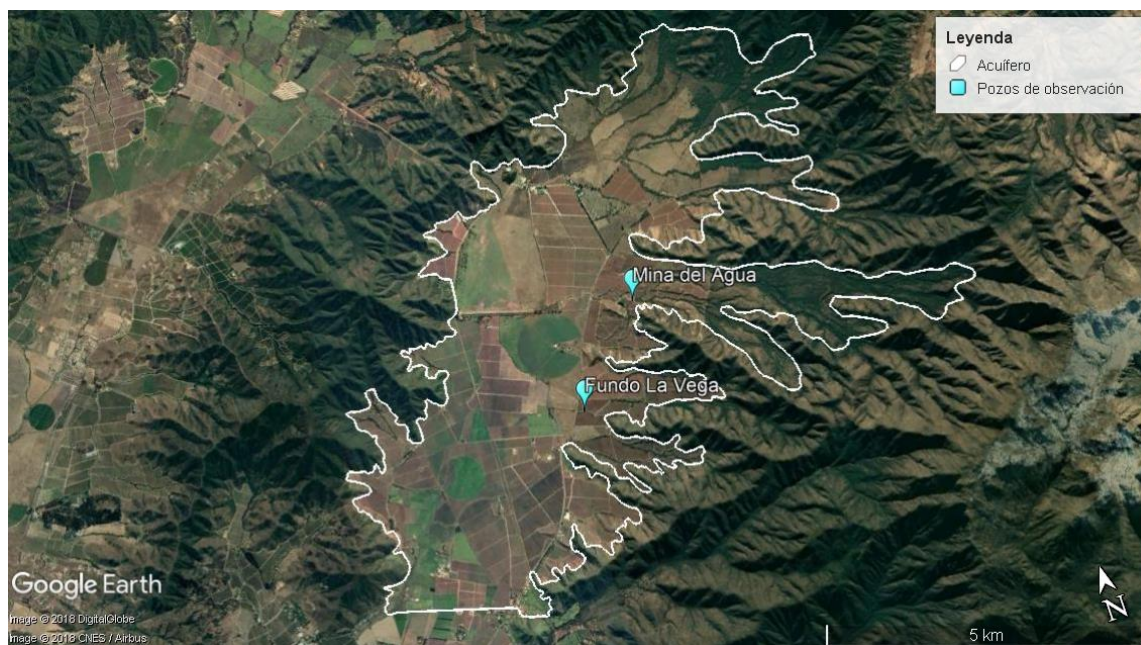
$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = 51,1 \left( \frac{L}{s} \right) - [468,6 \left( \frac{L}{s} \right) + 326,8 \left( \frac{L}{s} \right)]$$

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = -744,2 \left( \frac{L}{s} \right) \text{ o } -23.470.344 \frac{m^3}{año}$$

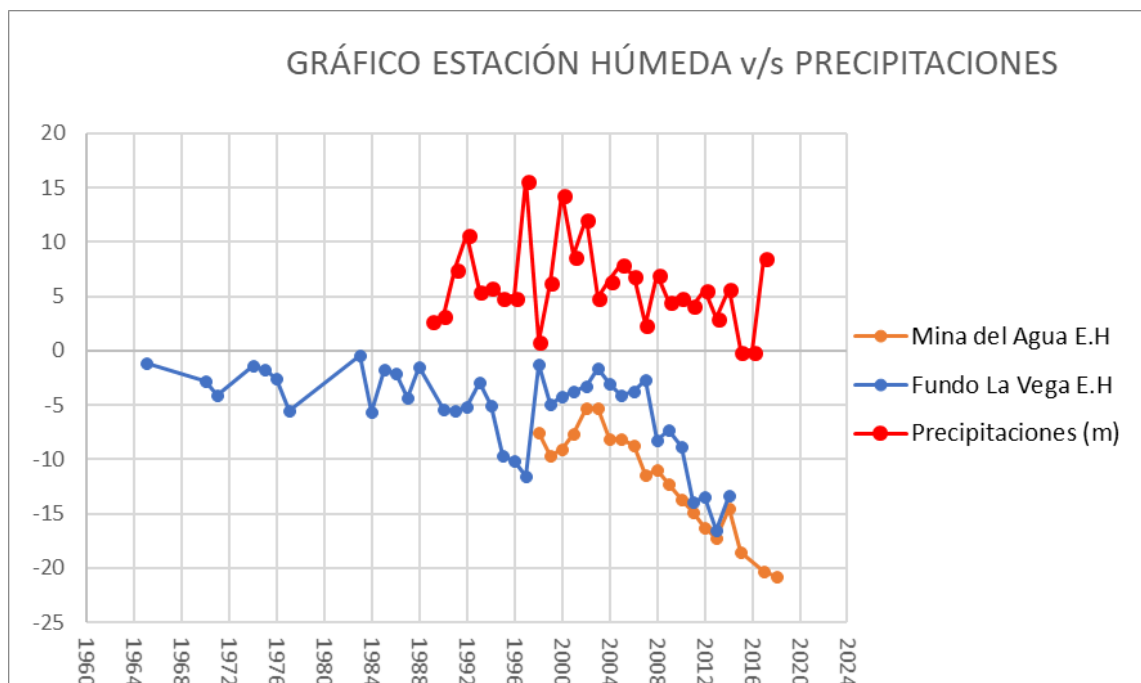
Este valor negativo significa que se está extrayendo agua desde el volumen de almacenamiento, por lo tanto existe una disminución en el almacenamiento del acuífero, debido a que las demandas superar considerablemente la recarga del acuífero y esto ha ido aumentando con los años, según el informe de Cabrera (1991) el balance hídrico fue de  $-7.726.320 \text{ m}^3/\text{año}$ , este aumento puede ser por la suma de diversos factores como el aumento de la demanda de agua subterránea, la extracción ilegal de este recurso y la disminución sostenida de las precipitaciones.

Para poder observar la variación de los niveles estáticos se utilizaron los datos de dos estaciones dentro de la cuenca: Mina del Agua y Fundo La Vega, su ubicación se observa en la Figura 24.

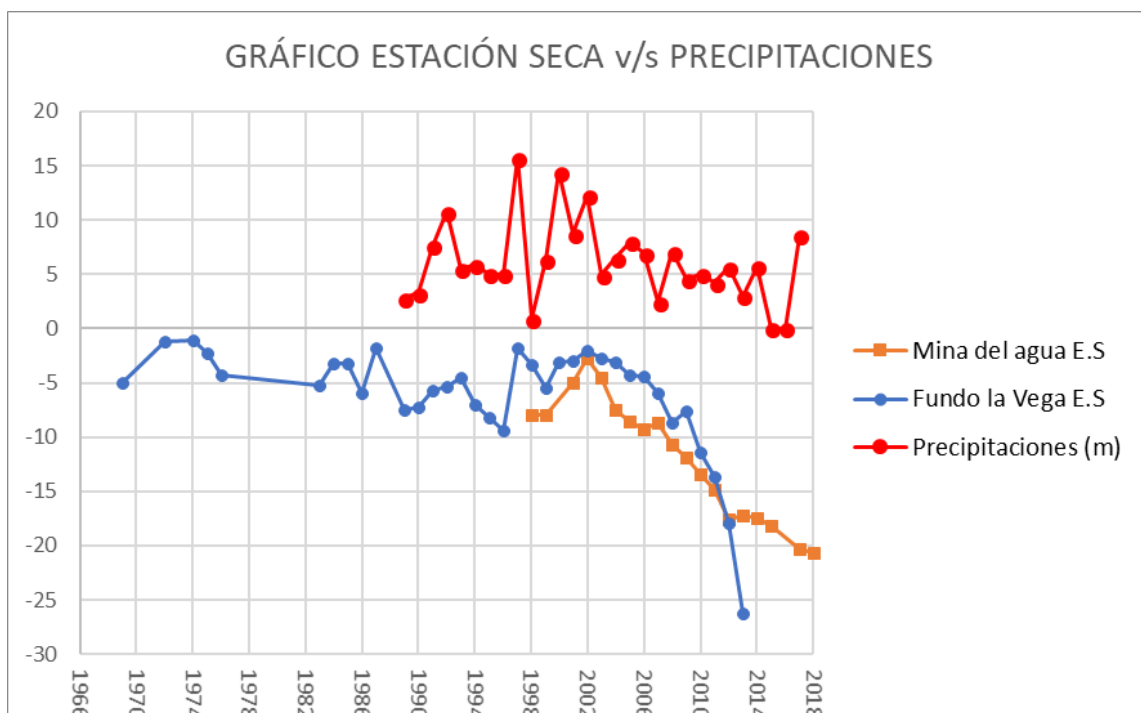
Se construyeron los gráficos de la Figura 25 y 26 que demuestran que la recarga es inferior a la descarga y por lo tanto los niveles han disminuido considerablemente, sobre todo en las estaciones secas (octubre-marzo) que además de haber menos cantidad de precipitación es el periodo en el cual comienza la temporada de viñedos y se extrae más agua para riego. Para los periodos secos el nivel estático ha tenido un descenso sostenido y en 17 años ha variado en aproximadamente 25 metros, esta situación no es muy distinta para los periodos húmedos en donde el descenso ha sido de casi 20 metros. Para un mismo periodo los niveles entre ambas estaciones no varían en más de 1 m



**Figura 24.-** Mapa con la ubicación de los pozos de observación Mida del Agua y Fundo La Vega. Modificado de Google Earth



**Figura 26.-** Gráfico de variación de niveles estáticos en estación húmeda v/s precipitaciones.  
Elaboración propia



**Figura 25.-** Gráfico de variación de niveles estáticos en estación seca v/s precipitaciones.  
Elaboración propia

## **6 MODELO CONCEPTUAL**

---

Un modelo conceptual es un esquema simplificado de cómo se comporta la naturaleza, en el caso particular de un modelo conceptual hidrogeológico su objetivo es representar las condiciones hidrogeológicas reales de la cuenca. El modelo conceptual del Valle Los Perales de Tapihue se realizó a partir de información geológica, hidrogeológica, geofísica y los parámetros que indican como es el comportamiento del flujo y que fueron analizados en los capítulos anteriores.

### **6.1 MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO**

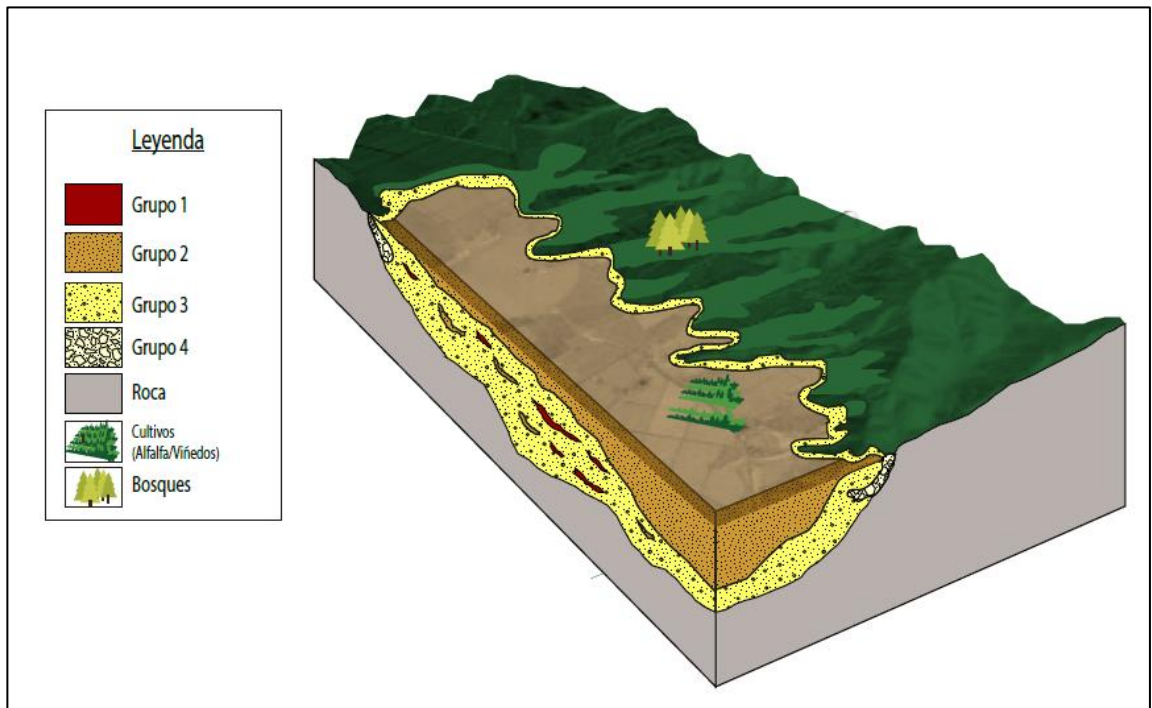
La cuenca está constituida por un relleno sedimentario no consolidado, probablemente de origen fluvial, aluvial y coluvial. Estos materiales, granulométricamente son gravas y arenas en la zona de las laderas de los cerros y sus espesores medidos varían entre 7 y 72 metros, en el centro del valle existe una capa superior de arcilla arenosa con espesores de entre 0.2 y 60 m y que disminuye conforme avanza hacia los bordes de la cuenca y bajo esta se encuentra una capa en su mayoría arenosa con espesores medidos 3 y 37 metros, esta capa presenta una intercalación con lentes arcillosos, esta distribución se observa en la Figura 27. Los espesores de la Unidad estratigráfica 2 aumentan hacia la zona sur y las potencias de las capas de la Unidad estratigráfica 3 aumentan hacia el norte. Los espesores presentados son espesores medidos debido a que no se tienen perforaciones que permitan estimar la potencia real.



## 6.2 MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO

### 6.2.1 Hidrogeología

Se determinó que el acuífero está conformado por tres unidades hidrogeológicas. La unidad más permeable y por lo tanto la de mayor importancia para su aprovechamiento es la Unidad 2 compuesta principalmente por arenas, esta unidad está limitada hacia arriba y hacia abajo por dos unidades impermeables, la Unidad 1 es la superior y está compuesta por arcilla y limo en su mayoría y la



**Figura 27.-** Modelo conceptual geológico. Elaboración propia.

Unidad 3 es la inferior compuesta por las rocas graníticas del basamento.

En cuanto al flujo de agua, este tiene un sentido N-S aproximadamente y se dirige desde la cabecera de la cuenca hacia el sector suroeste de esta y a su vez existe un flujo en dirección a esta misma zona, pero desde el sur (Figura 20).

### 6.2.2 Hidrología

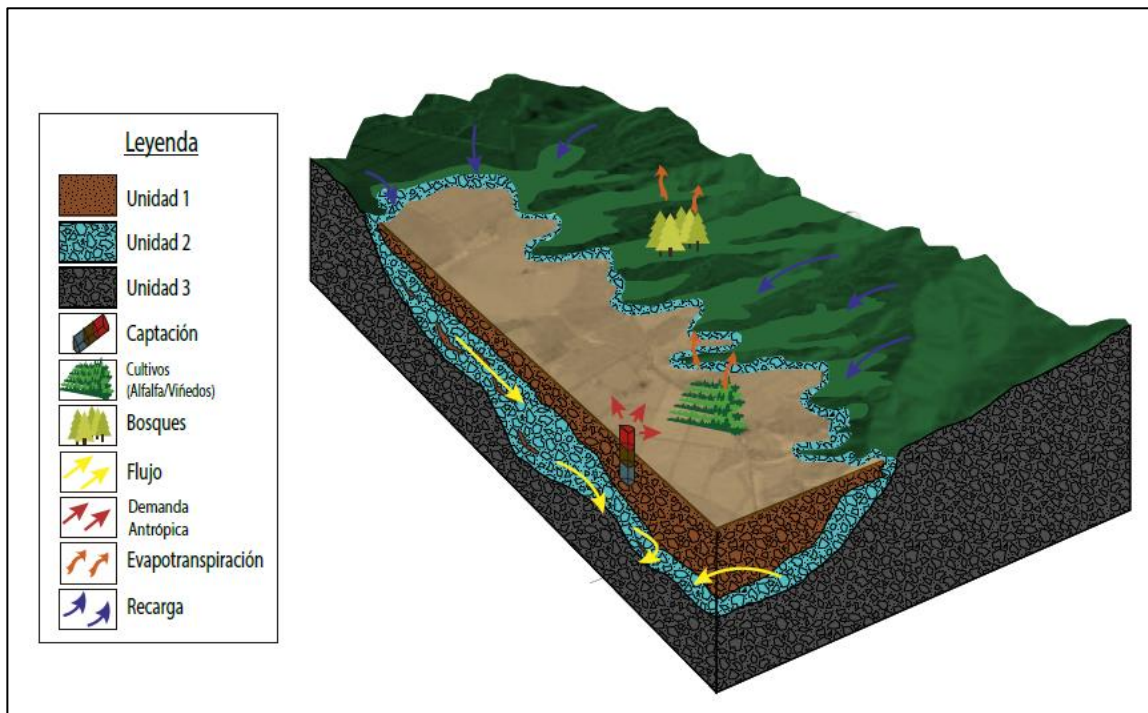
El acuífero tiene como única fuente de recarga las precipitaciones durante el periodo húmedo, siendo la precipitación media anual de 267.2 mm/año. Estas

precipitaciones se infiltran mediante las cuencas laterales ya que su confinamiento no permite una recarga por todo el valle.

Se determinaron que las descargas son producto de dos factores: Demanda hídrica por parte de la vegetación y las descargas antrópicas mediante las captaciones de agua.

Para el cálculo del balance hídrico se estimó un valor una recarga de -778.5 L/s, esto a causa de que las descargas son superiores a las recargas debido a la disminución progresiva de las precipitaciones y el aumento en la extracción de agua.

En la Figura 28 se muestra el modelo conceptual hidrogeológico, en el cual está representado todas las características mencionadas anteriormente.



**Figura 28.-** Modelo conceptual hidrogeológico. Elaboración propia.

## **7 DISCUSIÓN**

---

### **7.1 ESTRATIGRAFÍA**

La estratigrafía de la zona fue definida solo con los datos disponibles, los pozos con columna estratigráficas solo estaban presentes en la zona norte y la zona sur de la cuenca por lo que se correlacionaron ambas zonas y se interpolaron los datos existentes para poder determinar la estratigrafía del acuífero

Las diferentes descripciones de las columnas estratigráficas presentes en los expedientes de la DGA fueron realizadas por personas que no están preparadas profesionalmente para realizarlas correctamente, por lo que la nomenclatura variaba de acuerdo a la empresa o la persona responsable de realizar la perforación, por lo que se debió realizar la homogeneización según las permeabilidades relativas a partir de la granulometría del material pero esta clasificación podría variar según el criterio de quien las realice. Otra dificultad que implica la descripción por parte de personas que no son profesionales en el área es que solo contienen el nombre del sedimento observado, pero no especifican alguna otra característica como texturas, el grado de redondeamiento de los granos, la esfericidad de estos, la composición, etc. Por lo que dificulta determinar un origen de estos sedimentos.

En el marco geológico, se establece que el valle Los Perales de Tapihue se encuentra emplazado dentro de terrazas de abrasión marina, pero en este trabajo no se encontró evidencia que lo respalde, por lo que se sugiere realizar un nuevo estudio para comprobarlo.

### **7.2 HIDROGEOLOGÍA**

Las pruebas de bombeo son realizadas por una empresa o persona contratada para la construcción del catastro de pozos, pero no son fiscalizadas por alguna

entidad que corrobore la veracidad de estos datos, es así como durante la recopilación y construcción de la base de datos se verificó que varias de las pruebas de bombeos y columnas estratigráficas estaban repetidas, pero en diferentes zonas de la cuenca a por lo menos 1 km de distancia y en algunos casos variaban el caudal con el que se realizaba la prueba de gasto constante. Estas irregularidades pueden llevar a que la determinación de las constantes elásticas, en especial la transmisividad (T) determinada a partir de las pruebas de bombeo, tengan un cierto rango de error es así como algunos pozos de granulometría gruesa y alta permeabilidad presentaron las transmisividades más bajas como lo son el pozo P021 y P043. Además, el 100% de las pruebas de bombeo fueron realizadas sin contar con un pozo de observación para el cálculo del coeficiente de almacenamiento (S) y nuevamente esté sujeto al criterio de la persona que realice el estudio.

Para la dirección de flujo se estimaba que esta sería siempre en la misma dirección, desde la cabecera de la cuenca hasta la desembocadura continuando en esa dirección, pero mediante los cálculos se determinó que efectivamente una parte del flujo se dirige desde la cabecera hacia la desembocadura, pero converge junto con los flujos provenientes desde el sur a la zona suroeste de la cuenca. Esto puede ser posible a que existe un descenso de los niveles en ese sector, lo cual se evidencia en el mapa de isopiezas (Figura 15), este descenso se podría deber a una mayor extracción en esa zona mediante captaciones de agua subterránea.

Existe una diferencia en las transmisividades entre el modelo anterior con el del presente trabajo. En el primero la zona con mayores valores se encuentra al centro y con peor transmisividad en la zona externa (Figura 30) a diferencia del mapa de este estudio (Figura 18). Esto es debido a que en el estudio de 1991 los rangos varían entre 100 y 800 m<sup>2</sup>/día y no considera las zonas más externas a diferencia de este informe.

### **7.3 HIDROLOGÍA**

Existen dos pozos de observación en la zona de estudio monitoreados por la DGA, pero la información que se tiene de estos es escasa teniendo a lo más una medición por mes y no existía información para todos los meses por lo que el monitoreo no es completo para determinar una relación directa entre la cantidad de agua precipitada y la recarga al acuífero mediante el análisis de los niveles estáticos

Las recargas y descargar varían entre el modelo anterior y el actual debido a la disminución de las precipitaciones, lo que involucra que tanto el embalse y la escorrentía superficial, que, si se consideran en el modelo anterior, no estén presentes en este.

### **7.4 MODELO CONCEPTUAL**

Los modelos conceptuales fueron contruidos a partir de los datos recopilados y cálculos realizados a mediante estos, los cuales eran incompletos y en algunos casos contenían errores, por lo que los modelos conceptuales podrían ser mejorados o cambiar totalmente a medida que la información sea más completa y se realicen campañas a terreno para corroborarla.

## **8 CONCLUSIONES**

---

### **8.1 ESTRATIGRAFÍA**

La cuenca del esto Los Perales de Tapihue está conformada por relleno sedimentario no consolidado y los componentes según su granulometría son arcillas, limos, arenas y gravas, teniendo una mayor granulometría hacia las laderas de los cerros y la cabecera de la cuenca, una capa superior de material fino principalmente arcilla y debajo una intercalación entre lentes de arcillas y arenas las cuales son el principal componente del subsuelo.

Debido a que existen capas compuestas tanto de material fino como limo o arcilla junto con material grueso como grava y arenas sugiere un ambiente coluvial/aluvial, lo que provocaría esta heterogeneidad en los estratos, además la granulometría más gruesa en la cabecera de la cuenca y más fina en la desembocadura de esta estaría relacionado con la proximidad a la fuente de estos sedimentos lo que significaría que fueron transportados por un flujo proveniente desde las laderas de los cerros que limitan esta zona.

Los depósitos de arcilla presente en la zona central de la cuenca coinciden con la zona en dónde se encuentran las mayores pendientes hacia el sector este, lo que evidenciaría que desde ese lugar se depositaron a través de un flujo de barro

Los depósitos que se encuentran en las laderas de los cerros y son depósitos más gruesos tienen un origen coluvial y representan los escombros de falda.

### **8.2 HIDROGEOLOGÍA**

El acuífero está compuesto por tres Unidades Hidrogeológicas: La Unidad 1 se caracteriza por ser impermeable, pero almacenar gran cantidad de agua, está compuesta en su mayoría por arcillas y también limo. La Unidad 2 es la más

importante hidrogeológicamente ya que es la unidad con mayor permeabilidad y se encuentra semiconfinada en la parte superior por la Unidad 1 y debajo por la Unidad 3, compuesta por la roca granítica del basamento, también impermeable.

El acuífero en estudio es semiconfinado a lo largo de la cuenca por una capa de baja permeabilidad, que disminuye su espesor hacia la ladera de los cerros permitiendo la recarga del acuífero. Este acuífero en general es de regular a bueno, posee buena permeabilidad, buen drenaje.

La transmisividad del acuífero varía entre 43 y 1670 m<sup>2</sup>/día , teniendo como promedio 510 m<sup>2</sup>/día, por lo que el acuífero es clasificado en general como permeable correspondiente a arenas y gravas, además los mayores valores se encuentran en la ladera de los cerros, correspondientes a los conos de deyección lo que aumenta la permeabilidad de la zona y es concordante con la estratigrafía.

El coeficiente de almacenamiento para este valle se determinó que corresponden a rangos entre  $10^{-3}$  y  $10^{-4}$ , correspondientes a un acuífero semiconfinado.

El flujo de agua va desde la cabecera de la cuenca hacia la desembocadura por un lado y por el otro se dirige en sentido contrario convergiendo ambos flujos en el sector suroeste de la cuenca. Esto es debido a que en esta zona existe casi un tercio del total de caudal otorgado lo que produce un descenso en los niveles y por lo tanto en el gradiente hidráulico dirigiendo el flujo hacia ese sector

### **8.3 HIDROLOGÍA**

Las recargas del acuífero tienen su origen exclusivamente en las precipitaciones, ya que en la zona no existe actualmente una escorrentía superficial que pueda aportar agua al acuífero, además al ser un acuífero semiconfinado, no se produciría recarga a lo largo de este, solo es posible infiltrar agua al acuífero mediante las cuencas laterales.

Las descargas se producen por la demanda hídrica de la vegetación existente y por la extracción de agua artificialmente mediante las captaciones de agua. Al realizar el balance hídrico se determinó que la descarga supera la recarga produciéndose un balance negativo. Esto es producto de una sobreexplotación del acuífero y al descenso en las precipitaciones.

#### **8.4 MODELO CONCEPTUAL**

Fue posible realizar un modelo conceptual geológico e hidrogeológico de la cuenca a partir de la recopilación de datos y el análisis de estos respondiendo así tanto a los objetivos de este trabajo como a la hipótesis.



## 9 REFERENCIAS

---

AGROMET de la Red Agrometeorológica de INIA. *Estaciones*. Recuperado de: <http://agromet.inia.cl/estaciones.php>

CATA (2013). *Diagnóstico acabado de la Cuenca del Valle de Casablanca utilizando tecnología Geoespacial*. Universidad Técnica Federico Santa María

Chavarri, E. *Curso hidrogeología aplicada*. Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.

Comisión Nacional de Riego (1983). *Proyecto Maipo, Estudio Hidrológico e Hidrogeológico, Modelos Hidrogeológicos*.

Custodio, E, Llamas, M.R (1996) *Hidrología subterránea. Segunda Edición*.

Departamento de Estudios y Planificación de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (2013). *Informe Técnico. Análisis y Síntesis Preliminar de Iniciativas Sobre Recarga Artificial en Chile*.

Departamento de Estudios y Planificación de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (1991). *Estudio básico para la modelación del sistema de aguas subterráneas del valle de Casablanca*.

Díaz del Río, G. (1970) *Estudio hidrogeológico de la hoya del estero Casablanca*. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile.

Dirección General de Aguas. *Red Hidrométrica*. Recuperado de: <http://www.arcgis.com/apps/OnePane/basicviewer/index.html?appid=d508beb3a88f43d28c17a8ec9fac5ef0>

Dirección Meteorológica de Chile. *Guía Climática práctica*.

Dirección Meteorológica de Chile, Departamento de Climatología y Meteorología (2001). *Climatología regional*.

Gana. P, Wall. R, Gutiérrez. A (1996). *MAPA GEOLÓGICO DEL ÁREA DE VALPARAÍSO-CURACAVÍ, REGIONES DE VALPARAÍSO Y METROPOLITANA. ESCALA 1:100.000.*

Martínez. P.E, Martínez. P, Castaño. S. (2006). *Fundamentos de la Hidrogeología*, Madrid, España, Ediciones Mundi-Prensa

Rizzo Associates Chile. SA. (2015) *Actualización de la modelación Hidrogeológica e integrada de los acuíferos de la cuenca del estero de Casablanca.*

UNESCO (2012). *Glosario Hidrológico Internacional*, <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002218/221862M.pdf>

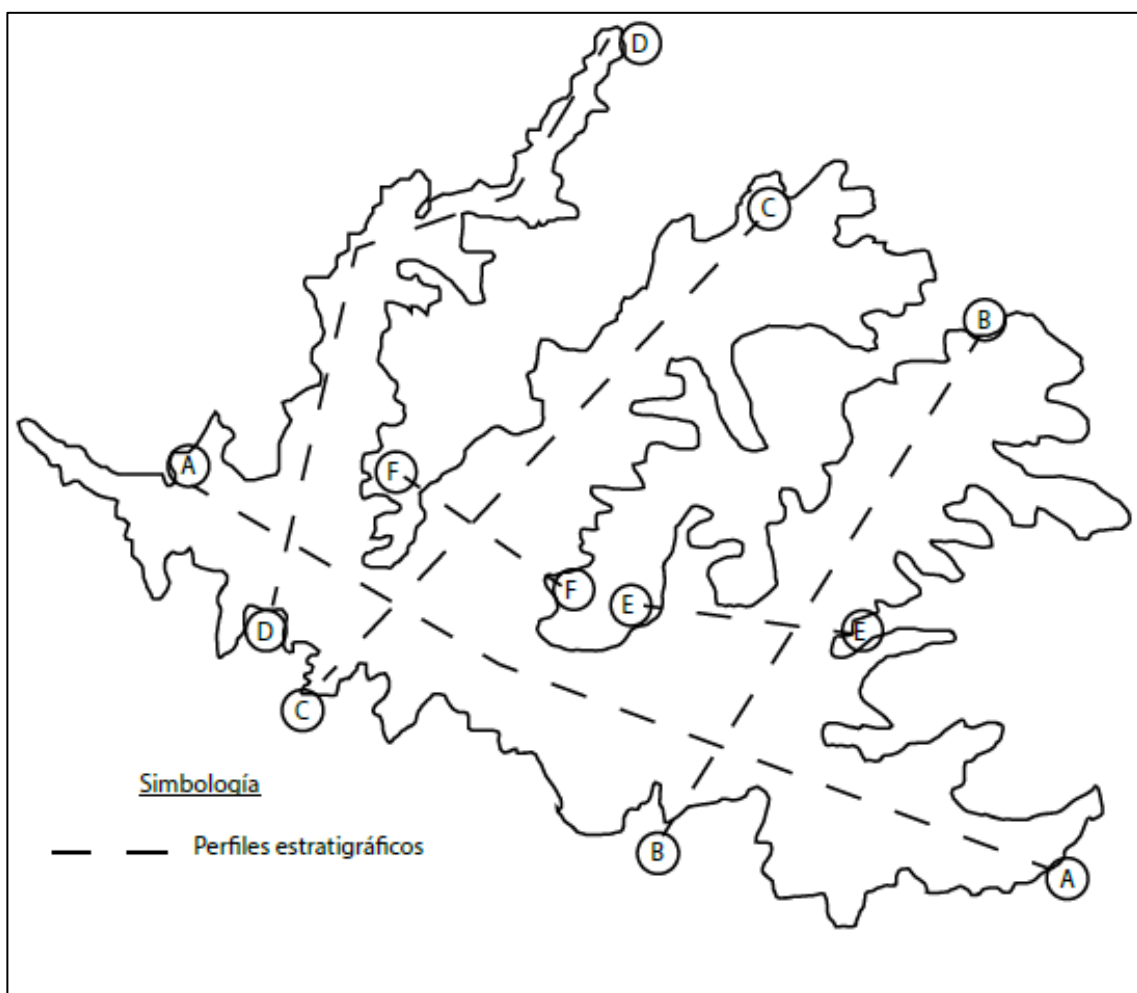
## 10 ANEXOS

---

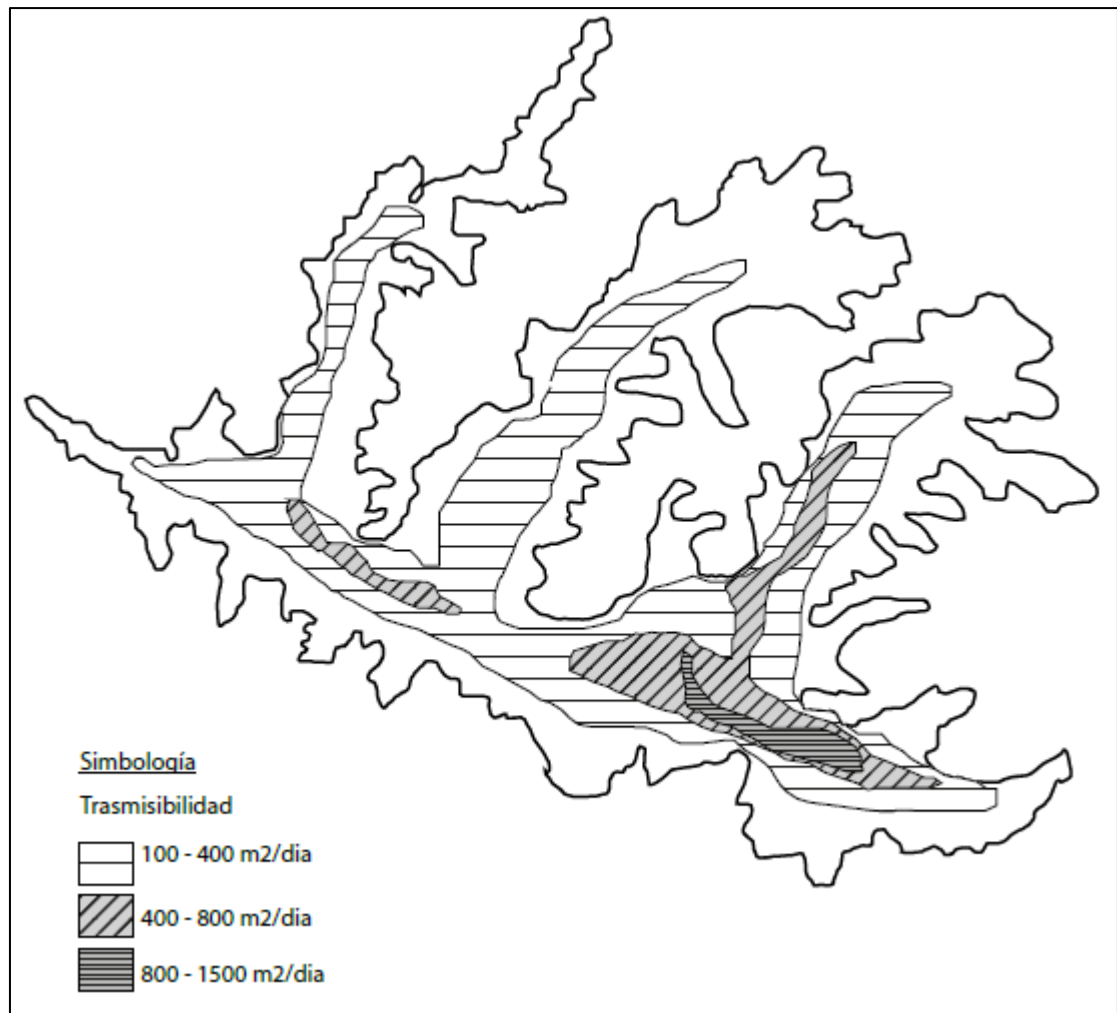
### 10.1 ANEXO 1: ANTECEDENTES GENERALES DE LA CUENCA

*Tabla 10.- Precipitaciones medias anuales (mm). Elaboración propia*

Año	Precipitación anual (mm)	
	Casablanca	Tapihue
1990	181,30	217,10
1991	468,10	455,30
1992	483,90	561,10
1993	244,10	300,60
1994	266,10	358,00
1995	240,30	208,00
1996	257,4	299,30
1997	900	908,00
1998	73,90	55,30
1999	224,70	413,10
2000	646,30	737,4
2001	475,90	526,10
2002	767,60	744,00
2003	338,60	309,30
2004	406,20	478,50
2005	468,00	560,50
2006	445,8	467,50
2007	170,00	163,00
2008	425,30	431,70
2009	279,00	280,00
2010	310,90	328,40
2011	244,10	252,00
2012	404,00	462,50
2013	212,80	180,50
2014	321,30	347,00



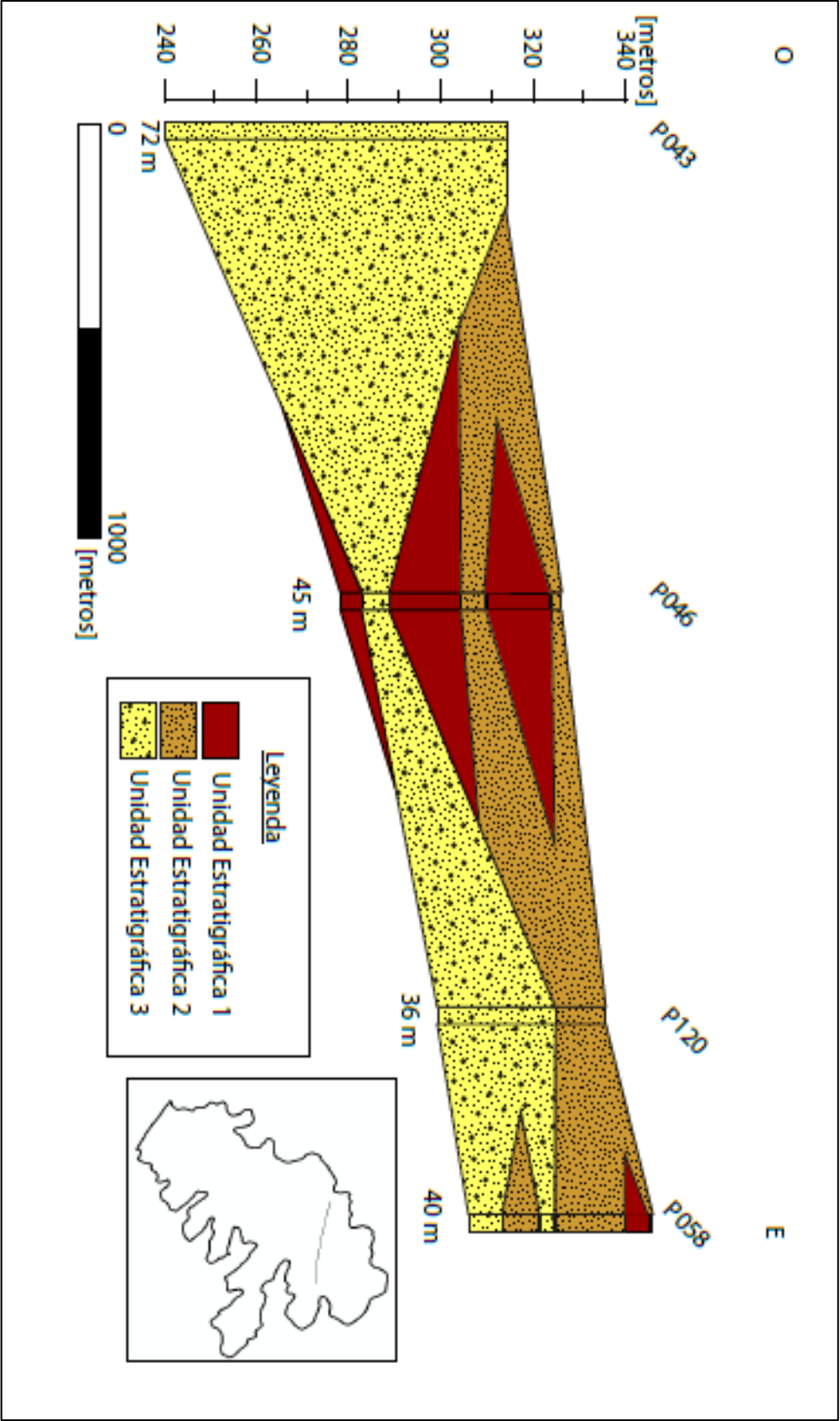
**Figura 29.-** Perfiles de estudio para los diferentes valles de la cuenca de Casablanca. Modificado de G. Cabrera, 1991.



**Figura 30.-** Plano de áreas de isotransmisividad. G. Cabrera, 1991.

10.2 ANEXO 2: ESTRATIGRAFÍA

Figura 31.- Perfil estratigráfico A-A'. Elaboración propia



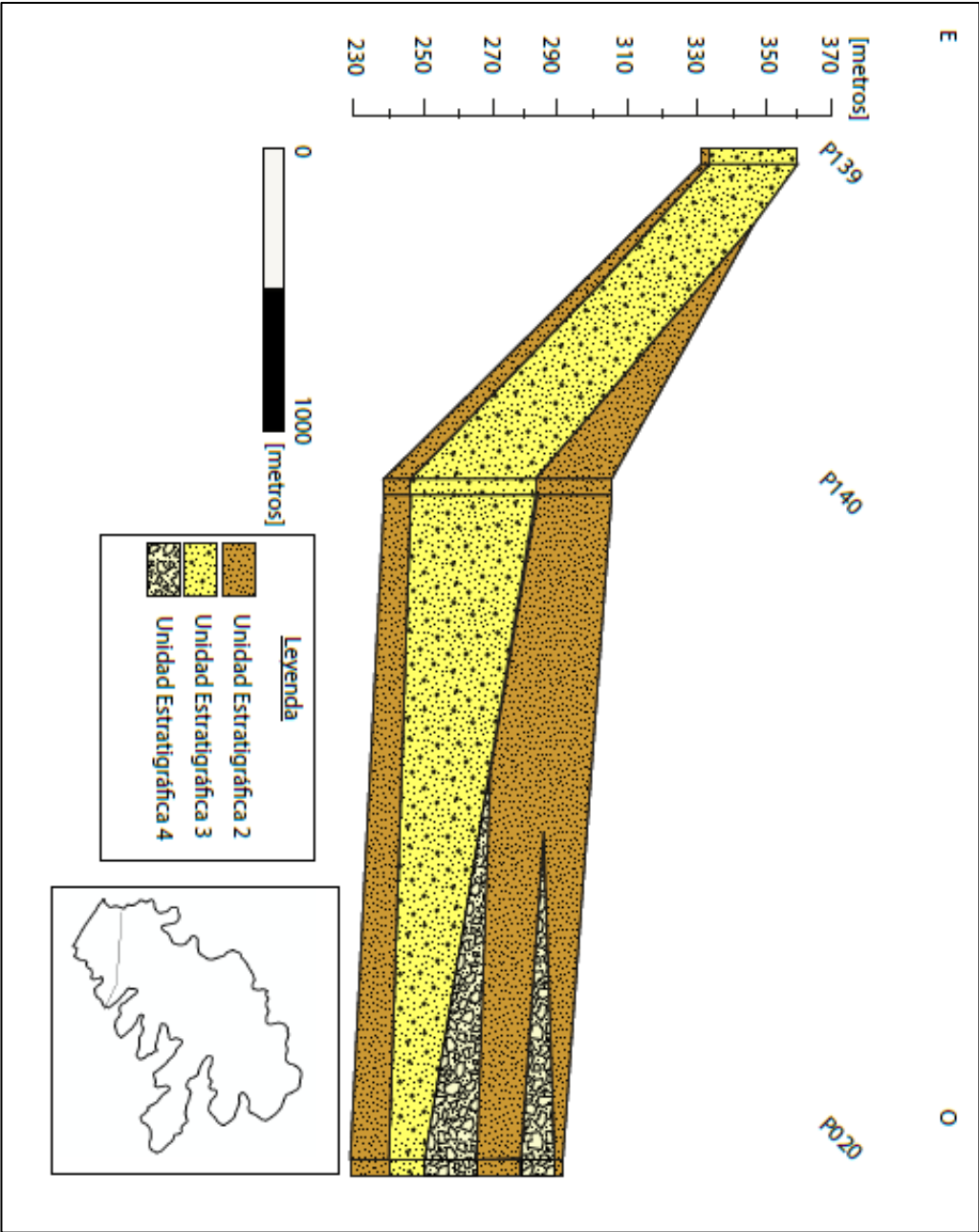


Figura 32.- Perfil estratigráfico B-B'. Elaboración propia

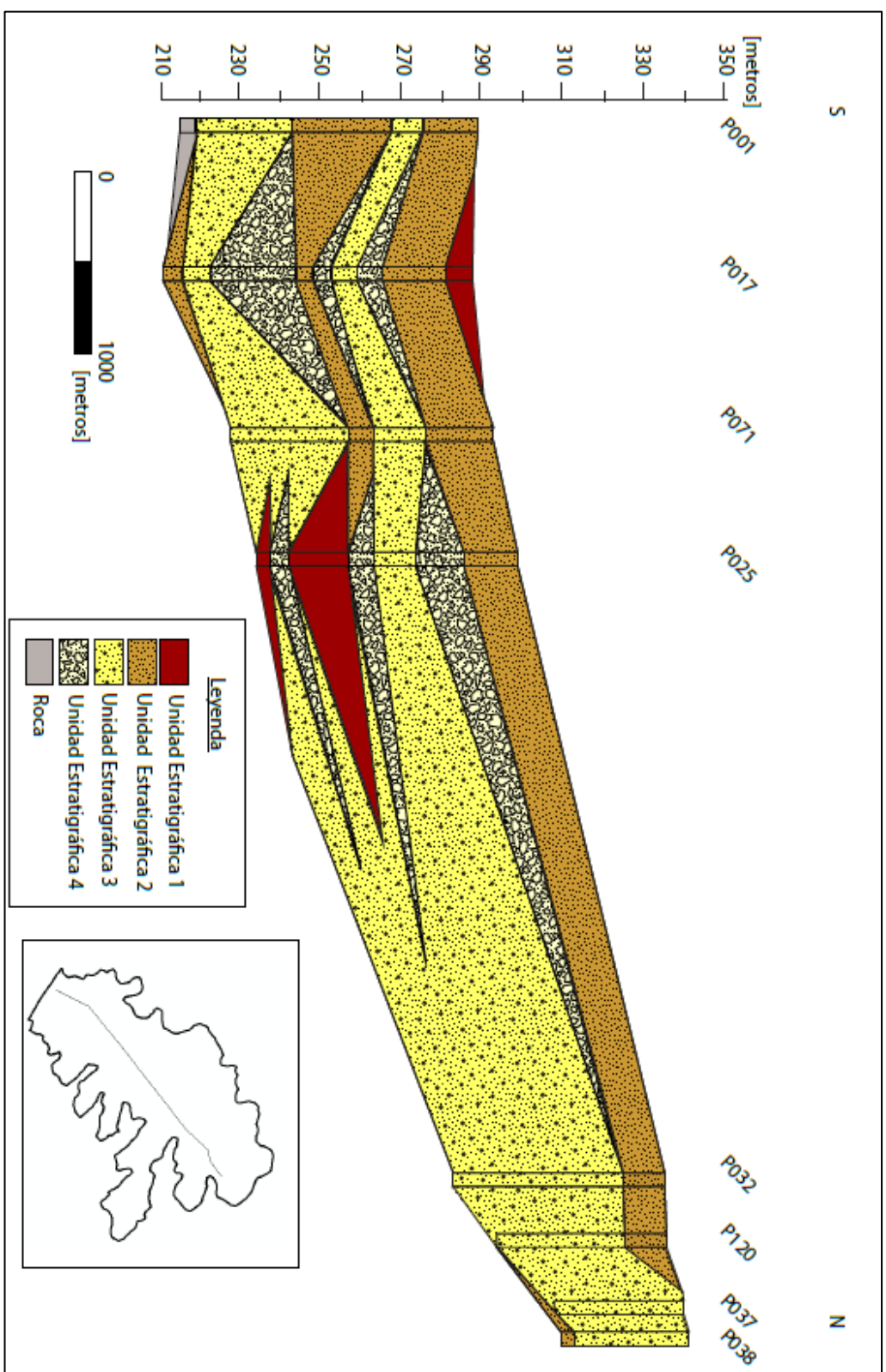


Figura 33.- Perfil estratigráfico C-C'. Elaboración propia



10.3 ANEXO 3: UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

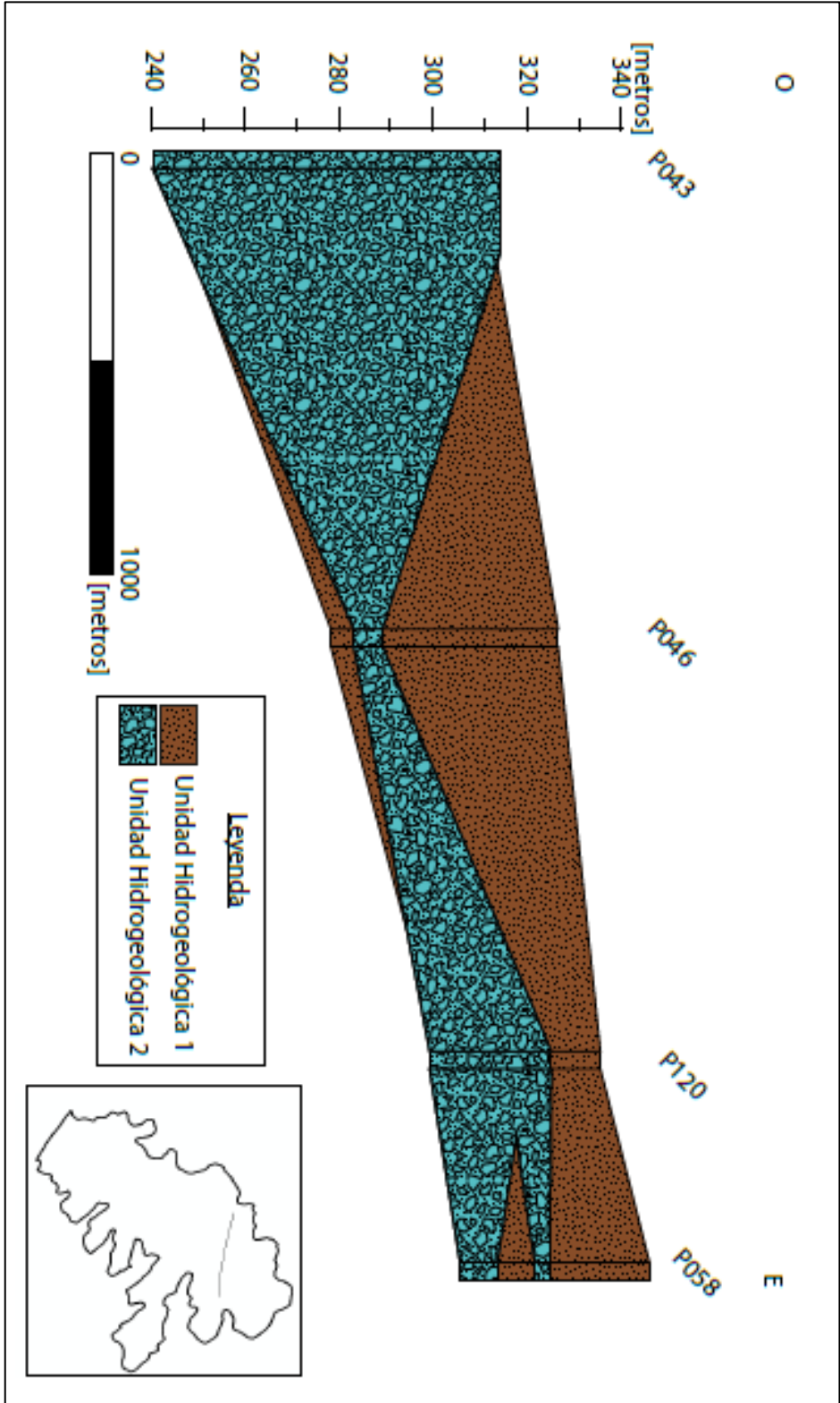


Figura 34.- Perfil hidrogeológico A-A'. Elaboración propia

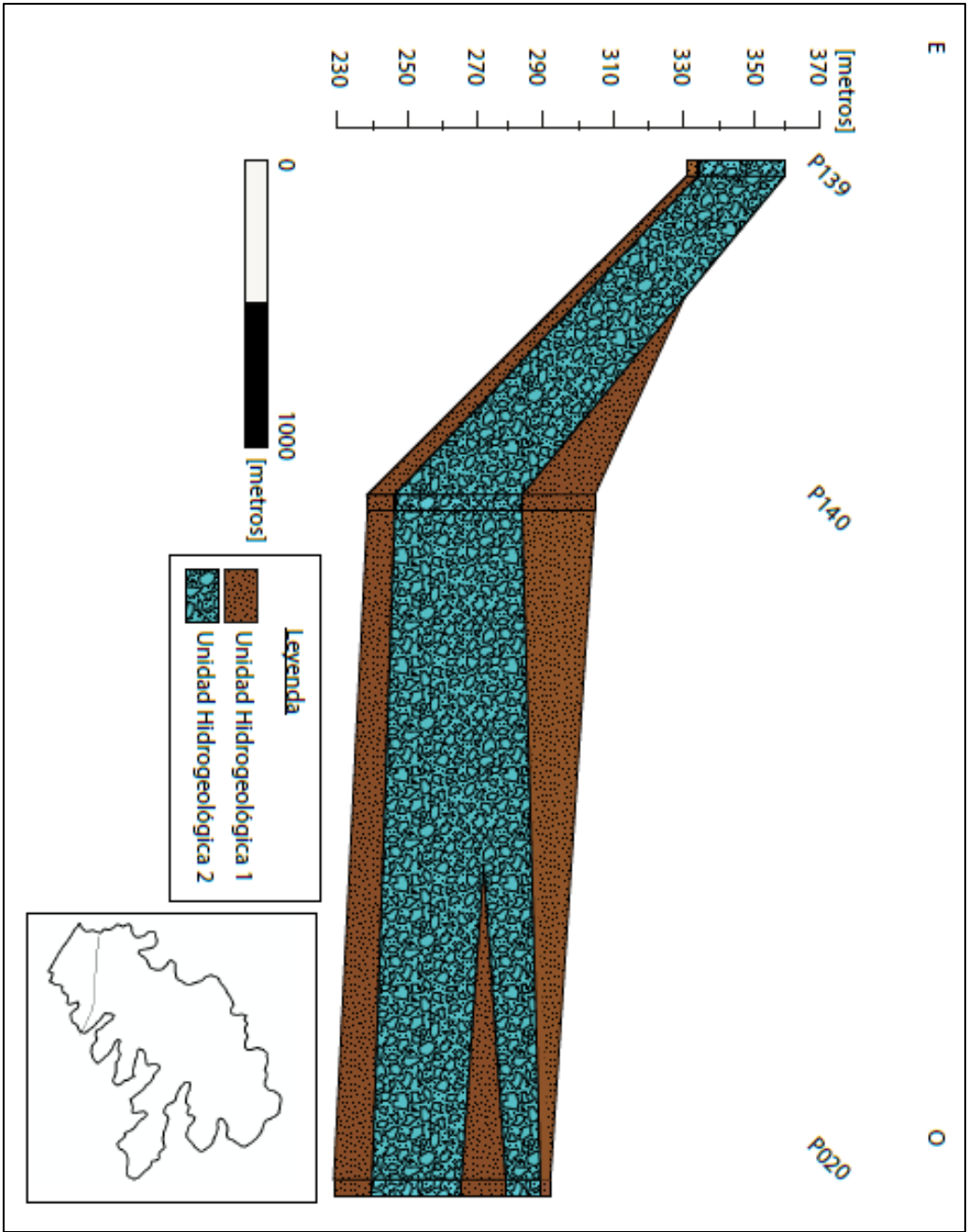


Figura 35.- Perfil hidrogeológico B-B'. Elaboración propia

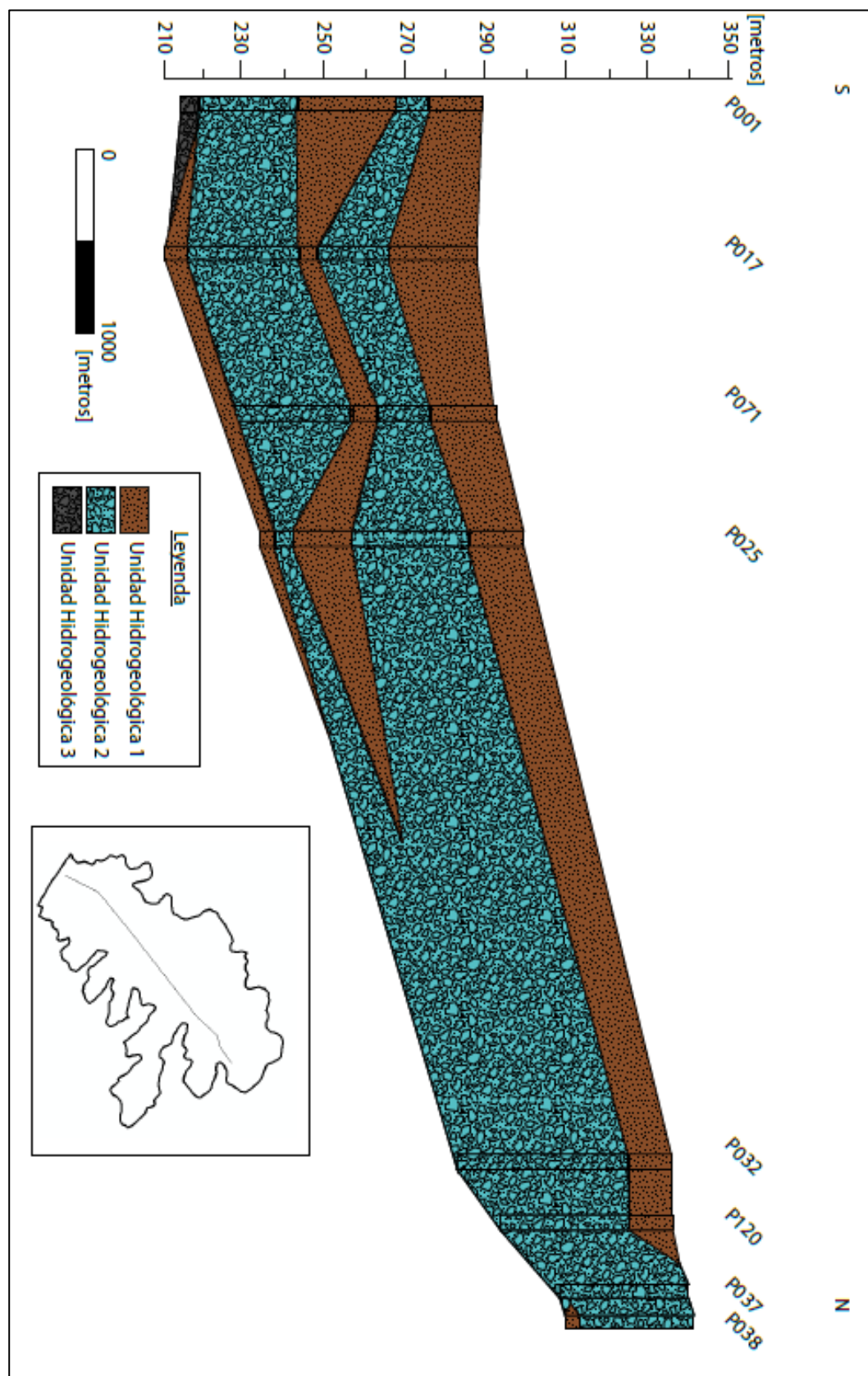


Figura 36.- Perfil hidrogeológico C-C'. Elaboración propia

#### 10.4 ANEXO 4: CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO

**Tabla 11.-** Niveles estáticos obtenidos de la campaña de Rizzos durante los meses de septiembre-octubre del 2014

Pozo	Captación Este WG S84	Captación Norte WG S84	Cota (m.s.n.m)	Cota Piezométrica (m.s.n.m)	Nivel (m)
P006	284658,00	6313317,00	296	281,93	14,07
P007	284496,00	6312398,00	304,76	291,53	13,23
P020	283351,00	6312180,00	307,59	292,95	14,64
P032	288322,00	6315756,00	349,48	330,84	18,64
P037	288850,00	6316344,00	353,95	334,12	19,83
P038	289000,00	6316490,00	355,98	336,66	19,32
P040	284857,00	6312113,00	308	291,21	16,79
P049	287661,00	6316474,00	339,8	323,06	16,74
P104	284794,00	6310686,00	328,53	298,74	29,79
P111	283592,00	6312744,00	311,71	294,93	16,78
P126	283588,97	6312138,19	305,14	291,02	14,12
P142	286701,00	6316205,00	329,95	316,61	13,34
P143	286996,00	6316810,00	332,41	320,14	12,27
P147	286726,00	6315885,00	314	299,59	14,41
P192	287677,96	6316065,60	343,53	322,17	21,36
P193	288902,72	6315559,56	358,74	341,1	17,64
P194	286659,65	6315391,45	329,93	313,11	16,82
P195	286495,52	6316833,40	329,67	318,08	11,59
P196	286492,00	6316836,00	312	300,41	11,59
P197	289886,56	6315917,06	376,06	357,86	18,2
P198	290412,85	6315748,19	391,97	370,77	21,2
P199	290655,78	6313696,58	396	382,15	13,85
P200	283505,40	6310905,08	310,02	290,27	19,75
P201	289525,92	6316150,14	363,54	344,16	19,38
P202	289525,92	6316150,14	363,54	344,16	19,38
P203	289525,92	6316150,14	363,54	344,16	19,38

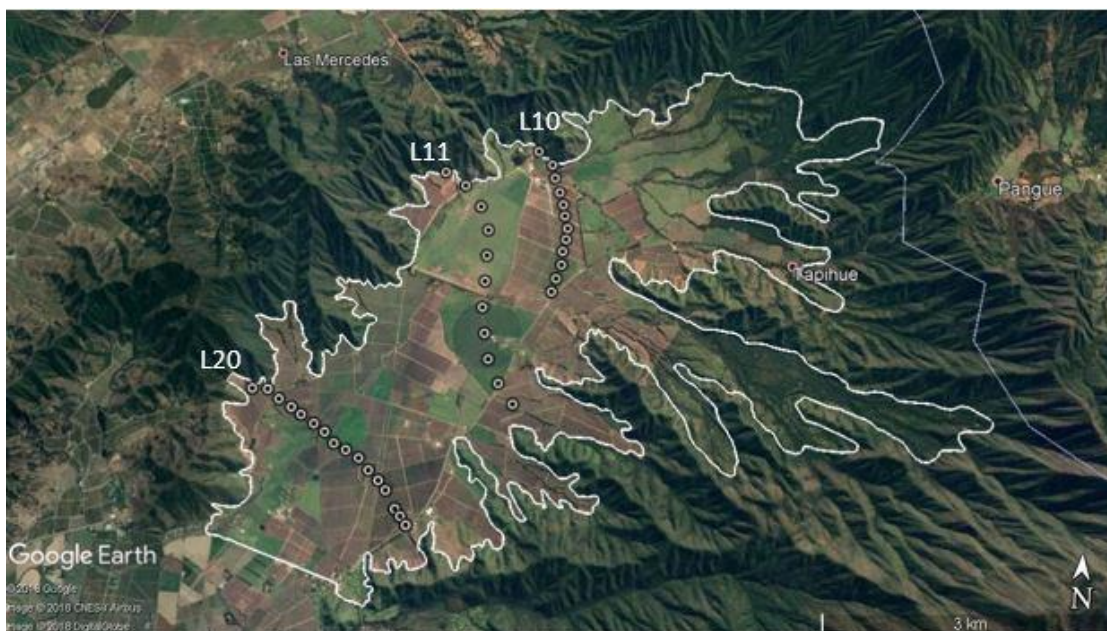
Pozo	Captación Este WGS84	Captación Norte WGS84	Cota (m.s.n.m)	Cota piezometrica (m.s.n.m)	Nivel (m)
P204	289525,92	6316150,14	363,54	344,16	19,38
P205	289467,24	6315944,80	365,5	344,64	20,86
P206	289006,83	6315817,50	357,52	338,02	19,5
P207	283494,05	6311130,38	309,16	290,38	18,78
P208	283487,02	6311134,39	309,05	290,43	18,62
P209	283505,40	6310905,08	310,02	290,27	19,75
P210	283434,34	6311749,49	305,06	291,39	13,67
P211	284658,28	6310769,31	322,62	304,46	18,16
P212	284230,88	6312078,94	304,94	290,54	14,4
P213	289177,68	6316201,00	357,4	338,97	18,43
P214	283949,73	6310683,06	360,37	341,96	18,41
P215	282258,44	6310314,59	302,69	288,86	13,83
P216	285704,90	6313043,71	319,2	302,97	16,23
P217	285126,75	6313155,34	314,33	298,92	15,41
P218	284699,86	6309508,08	330,75	316,42	14,33
P219	283272,56	6308853,61	311,28	292,5	18,78
P220	283260,13	6309713,64	312,22	291,33	20,89
P221	284601,05	6310614,88	326,08	296,87	29,21
P222	283868,03	6312331,08	306,89	292,76	14,13
P223	283853,43	6311193,46	307,76	291,48	16,28
P224	283661,23	6311876,37	306,9	288,69	18,21
P225	283521,73	6312019,61	305,06	289,9	15,16
P226	282152,31	6310813,30	302,34	288,62	13,72
P227	282300,03	6308953,78	306,68	290,68	16
P228	283362,28	6309565,87	313,44	291,66	21,78
P229	284788,35	6312693,19	307,91	288,39	19,52

**Tabla 12.-** Valores de transmisividad, espesor y permeabilidad del acuífero.  
Elaboración propia

Pozo	Captación Este WGS84	Captación Norte WGS84	Transmisividad (T) (m <sup>2</sup> /dia)	Espesor (b) (m)	Permeabilidad (K) (m/dia)
P016	284076,00	6312920,00	66	120	0,55
P017	283901,00	6312230,00	158	170	0,93
P018	283576,00	6312030,00	55	90	0,61
P019	284151,00	6312460,00	87	170	0,51
P020	283351,00	6312180,00	101	60	1,68
P021	286561,00	6316405,00	43	120	0,36
P025	285522,00	6313594,00	213	120	1,78
P029	285331,00	6313620,00	273	120	2,28
P032	288322,00	6315756,00	214	30	7,13
P037	288850,00	6316344,00	176	90	1,96
P038	289000,00	6316490,00	173	90	1,92
P043	286487,00	6316791,00	72	90	0,80
P044	285512,00	6316280,00	269	90	2,99
P045	285549,00	6316064,00	151	120	1,26
P046	287635,00	6316547,00	399	120	3,33
P058	289360,95	6316573,19	335	90	3,72
P120	288517,00	6316084,00	1670	90	18,56
P137	285990,00	6312250,00	613	60	10,22
P139	286909,00	6311534,00	1150	30	38,33
P140	285935,00	6311998,00	408	60	6,80



## 10.5 ANEXO 5: GEOFÍSICA



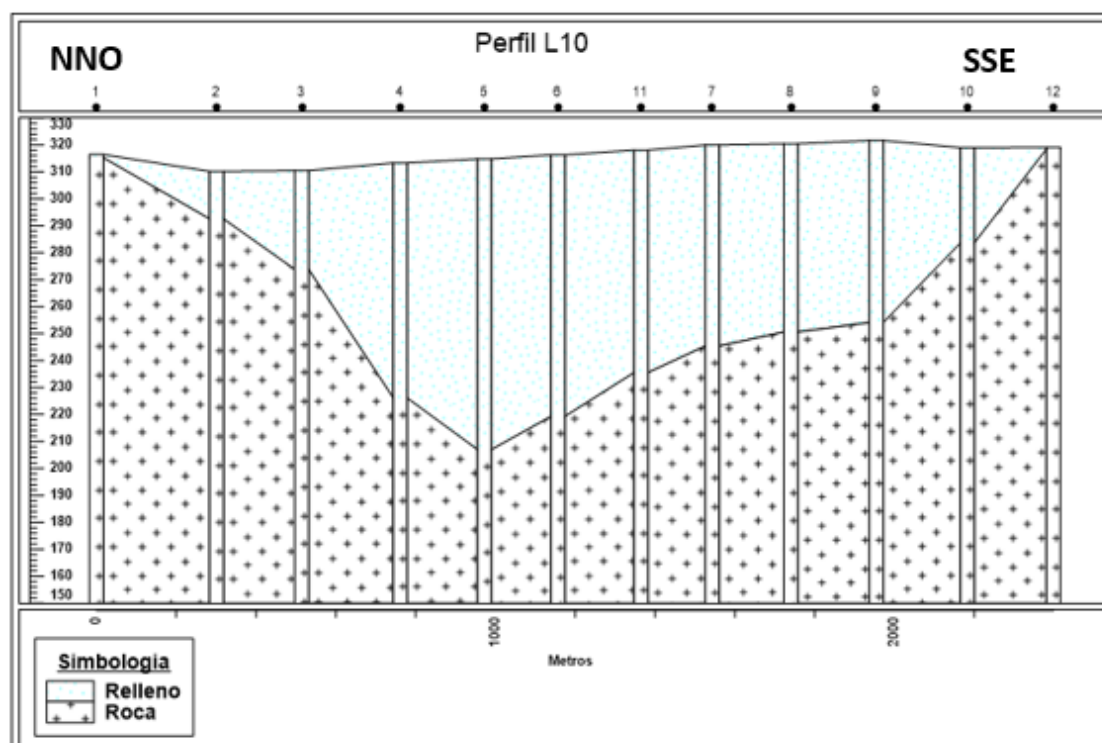
**Figura 37.-** Mapa de la ubicación de los perfiles geofísicos. Modificado de Google Earth

**Tabla 13.-** Secciones y valores de parámetros para el cálculo de la dirección de flujo. Elaboración propia

Seccion	T ( $m^2$ /dia)	a (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta l$ (m)	Q (l/s)	Q ( $m^3$ /dia)
I	686	2.400	10	1.000	190,6	16.464
II	399	3.200	10	800	184,7	15.960
III	134	4.000	10	800	77,5	6.700
IV	132	3.600	10	720	76,4	6.600
V	100	2.800	10	1.360	23,8	2.058
VI	50	400	10	800	0,0	0
VII	511	1.000	10	1.000	87,0	7.514

**Tabla 14.-** Información obtenida del perfil geofísico L10. (Geodatos)

Perfil	UTM WGS84		Estación	Elevación Cota m	Bouguer mGals	Elevación Basamento m	Profundidad (Espesor) m
	Este	Norte					
	m	m					
L10	286895,51	6317234,8	1	316,43	34,88	315,2	1,23
L10	287125,11	6317040,3	2	310,22	34,57	292,51	17,71
L10	287185	6316835,5	3	310,47	34,19	273,81	36,66
L10	287278,84	6316607,2	4	313,32	33,48	226,13	87,19
L10	287352,64	6316409,3	5	314,82	33,19	206,96	107,86
L10	287391,84	6316229,5	6	316,31	33,32	219,29	97,02
L10	287453,03	6316030,2	11	318,04	33,62	235,55	82,49
L10	287446,04	6315851,8	7	319,96	33,76	245,42	74,54
L10	287411,1	6315658,2	8	320,41	33,96	250,59	69,82
L10	287415,51	6315443,7	9	321,66	34,1	254,14	67,52
L10	287352,89	6315224,6	10	318,99	34,7	283,6	35,39
L10	287303,11	6315014,4	12	319,14	35,44	318,47	0,67

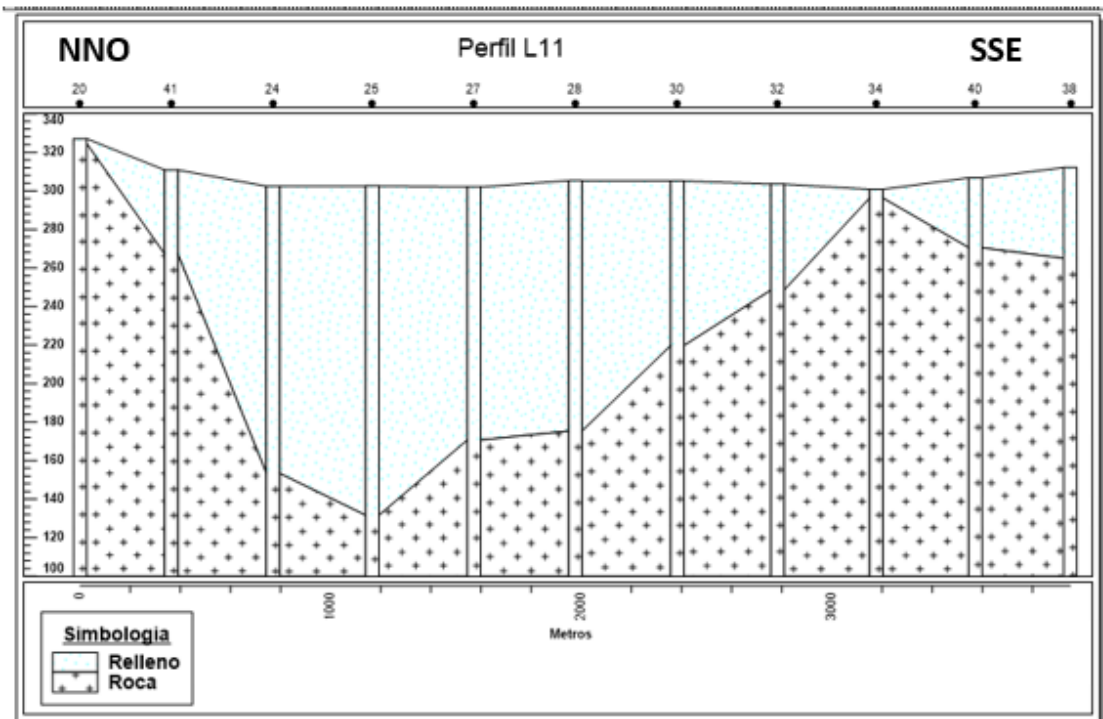


**Figura 38.-** Perfil geofísico L10. Elaboración propia



**Tabla 15.-** Información obtenida del perfil geofísico L11. (Geodatos)

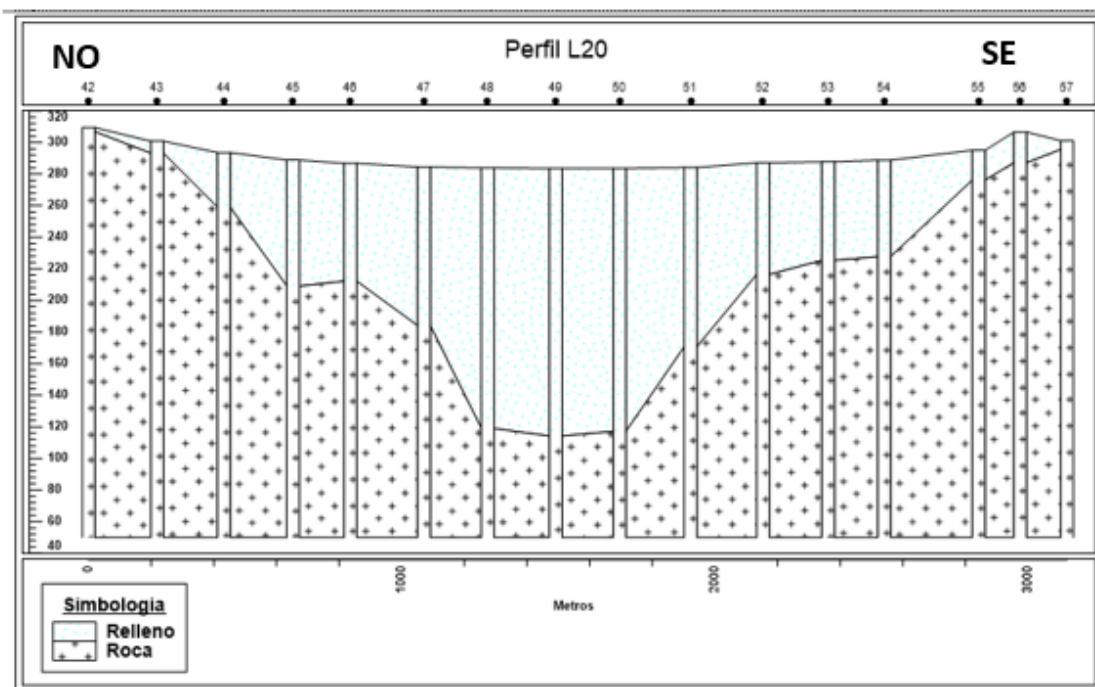
Perfil	UTM WGS84		Estación	Elevación Cota m	Bouguer mGals	Elevación Basamento m	Profundidad (Espesor) m
	Este	Norte					
	m	m					
L11	285504,34	6316748,9	20	327,04	36,73	324,46	2,58
L11	285826,47	6316580,3	41	310,83	36,06	267,22	43,61
L11	286094,89	6316275,8	24	302,41	34,87	153,39	149,02
L11	286248,36	6315910,1	25	302,55	34,7	131,58	170,97
L11	286270,05	6315505,1	27	302	35,04	170,71	131,29
L11	286288,66	6315100,8	28	305,35	35,31	175,35	130
L11	286295,62	6314694,4	30	305,16	36,13	219,66	85,5
L11	286370,59	6314301,7	32	303,45	36,93	248,44	55,01
L11	286468,2	6313919,8	34	300,77	38,12	296,22	4,55
L11	286656,33	6313571,9	40	306,76	37,7	270,46	36,3
L11	286900,93	6313283,1	38	312,06	37,68	264,95	47,11



**Figura 39.-** Perfil geofísico L11. Elaboración propia.

**Tabla 16.-** Información obtenida del perfil geofísico L20. (Geodatos)

Perfil	UTM WGS84		Estación	Elevación	Bouguer	Elevación	Profundida d (Espesor)
	Este	Norte				Basamento	
	m	m		m		m	
L20	283080,79	6313164,4	42	309,37	46,67	306,77	2,6
L20	283299,69	6313176,8	43	300,83	46,39	293,15	7,68
L20	283474,14	6313054,7	44	293,6	45,55	258,86	34,74
L20	283670,57	6312953,2	45	288,86	44,69	209,08	79,78
L20	283827,5	6312859,5	46	286,8	44,44	212,21	74,59
L20	284033,28	6312746,5	47	284,48	43,68	184,04	100,44
L20	284207,79	6312641,7	48	283,92	42,83	118,98	164,94
L20	284364,52	6312490,7	49	283,52	42,53	114,17	169,35
L20	284551,94	6312411	50	283,54	42,42	117,19	166,35
L20	284755,5	6312311,4	51	284,18	42,89	170,65	113,53
L20	284923,85	6312152,6	52	287,14	43,35	216,46	70,68
L20	285085,06	6312021,2	53	287,78	43,46	225,37	62,41
L20	285209,27	6311892,5	54	288,82	43,42	227,76	61,06
L20	285379,41	6311643,5	55	295,06	43,92	276,18	18,88
L20	285472,46	6311549,3	56	306,59	43,83	287,12	19,47
L20	285568,99	6311434,6	57	301,14	44,05	295,57	5,57



**Figura 40.-** Perfil geofísico L20. Elaboración propia